



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**MATTI LASSILA**

DIFFUUSIOVARAUTUMISEEN PERUSTUVAN HIUKKASANTURIN  
KARAKTERISOINTI JA SEN HYÖDYNTÄMINEN DIESELAJONEU-  
VON HIUKKASPÄÄSTÖJEN MITTAAMISESSA

Syventävien opintojen opinnäytetyö

Tarkastaja: dosentti Topi Rönkkö  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
1. marraskuuta 2017

## TIIVISTELMÄ

**MATTI LASSILA:** Diffuusiovarautumiseen perustuvan hiukkasanturin karakterisointi ja sen hyödyntäminen dieselajoneuvon hiukkaspäästöjen mittaamisessa  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Syventävien opintojen opinnäytetyö, 52 sivua  
Marraskuu 2017  
Pääaine: Fysiikan pitkä opetettava aine  
Tarkastaja: dosentti Topi Rönkkö

**Avainsanat:** Varatut hiukkaset, hiukkaspäästöt, hiukkasanturi, diesel, diffuusiovaraaja

Ilmansaasteet ovat nykypäivänä yksi suurimmista ongelmista ihmiskunnalle. Ilmastonmuutoksen lisäksi saasteiden sisältämien pienhiukkasten on tutkittu aiheuttavan terveyshaittoja ja jopa kuolemia. Diesel-ajoneuvojen osuus pienhiukkaspäästöistä on merkittävä erityisesti tiheään asutuissa maissa. Tämän opinnäytetyön mittaukset ja tulokset ovat osa TAQIITA-projektia, joka liittyy erityisesti Intian ilmanlaatuongelmiin. Tässä opinnäytetyössä tehdyllä tutkimuksella pyritään edistämään sitä, että kaupunki-ilmaa voitaisiin tulevaisuudessa mitata uudella tavalla ja kustannustehokkaasti.

Tutkimuksen ensimmäinen vaihe oli hiukkasten sähköiseen varaukseen perustuvan eFilter-mittalaitteen toiminnan karakterisointi, jonka avulla selvitimme laitteen soveltuvuutta päästömittauksiin. Tutkimuksessa havaittiin, että eFilterin toiminta on normaaliasetuksilla luotettavinta suunnilleen hiukkaskokovälillä 50 – 500 nm. Laitteen toiminnan havaittiin olevan samanlaista sekä neutraaleja että kerran varattuja hiukkasia mitattaessa. Hiukkaspitoisuuden suuruudella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta mittaustarkkuuteen. Epävarmuutta tulosten luotettavuuteen aiheuttivat laitteen signaalin taustakohina, sekä odottamattomat mittaussignaalin notkahdukset. Jos nämä ongelmat saadaan laitteesta poistettua tai minimoitua, niin laite on ominaisuuksiltaan hyvin sopiva liikenteen päästöjen mittaukseen.

Toisena tutkimusvaiheena oli selvittää ohiajomittauksen avulla, kuinka dieselmoottorin päästöjen sähköisesti varautuneet hiukkaset käyttäytyvät ilmassa etäisyyden sekä ajan funktiona. Lisäksi tutkimme eri ajotilanteiden vaikutusta varautuneiden hiukkasten osuuteen sekä eFilterin toimintaa kyseisissä mittauksissa. Tutkimuksen tulosten mukaan varautuneiden hiukkasten osuus taustailman kokonaishiukkaspitoisuudesta oli noin 60 %. Vakionopeudella 40 km/h ohi ajavan dieselauton päästöissä varattujen hiukkasten osuus oli yhden metrin etäisyydeltä mitattuna noin 75 %. Jatkuvasti kiihdyttäen ajavan auton päästöissä puolestaan vastaava osuus oli 40 %. Tutkimuksissa ei havaittu merkittävää muutosta varattujen hiukkasten osuudessa etäisyyden tai ajan funktiona, kun tutkittu maksimietäisyys päästölähteestä oli 7 m ja päästön maksimiaika ilmassa 30 s.

Näiden tutkimusten perusteella tulevaisuudessa olisi tärkeää tutkia päästöjen sisältämien varautuneiden hiukkasten osuuden muutoksia mitaten pidempiä aikavälejä sekä suurempia etäisyyksiä. Lisäksi hiukkasia tulisi tutkia kokoluokittain, jotta saataisiin tarkempaa tietoa esimerkiksi nukleatiomoodin merkityksestä varattujen hiukkasten kokonaisosuudelle.

## ABSTRACT

**MATTI LASSILA:** Characterization of a diffusion charger based sensor and measurement of particulate matter in diesel emissions

Tampere University of Technology

Thesis for Advanced Studies, 52 pages

November 2017

Major: Major Teaching Subject in Physics

Examiner: Docent Topi Rönkkö

**Keywords:** Charged particles, particulate matter emissions, particle sensor, diesel, diffusion charger

Air pollution is one of the biggest problems for humankind. Studies show that particulate matter in air causes health problems and even deaths. Diesel vehicles account for a significant fraction of particulate emissions, especially in densely populated countries. The measurements and results of this thesis are part of the TAQIITA project, which is related to air quality problems in India. This thesis has two research topics that advance the goal of measuring urban air in a new and cost-effective manner in the future.

The first stage of the research was characterization of the eFilter measuring device. The study found that with default settings, eFilter operates most reliably at a particle size range of 50 – 500nm. The operation of the device was similar with both neutral and once charged particles. The magnitude of particle concentration did not have a significant effect on the measurement accuracy. Factors that increased the uncertainty in the measurements were background noise and unexpected drops in the measurement signal. After removing or at least minimizing the effects of these problems, the device is very suitable for measuring traffic emissions.

The second stage of the research was to find out how the electrically charged particles of diesel engine emissions behave in the air as a function of distance and time. In addition, we investigated the impact of different driving conditions on the proportion of charged particles in the emissions. According to the results of the study, the charged particles in the background air was about 60 % of the total particle number concentration.

With the diesel vehicle driving by at a constant speed of 40 km/h, the number concentration of charged particles at the distance of one meter was about 75 % of the total particle number concentration. With the vehicle driving by with constant acceleration, the corresponding percentage was 40 %. There was no significant change in the proportion of charged particles as a function of distance or time when the maximum distance from the emission source was 7 m and the maximum emission time in air was 30 s.

Based on these studies, it would be important in the future to study the changes in the proportion of charged particles in the emissions over longer distances or periods. In addition, the particles should be examined by size class in order to obtain more accurate information on the significance of the nucleation mode.

## ALKUSANAT

Lukijassa saattaa herättää ihmetystä miksi tätä työtä ei kutsuta diplomityöksi. Asia johtuu siitä, että olen jo diplomityöni tehnyt. Tämä työ on tehty erilliseksi opinnäytteeksi fysiikan opettajan pätevyyttä varten ja on ensimmäinen laatuaan. Tämä työ mahdollistaa minulle valmistumisen myöhään heränneeseen kutsumusammattiini ja olen siitä erittäin kiitollinen. Tästä mahdollisuudesta haluan erityisesti kiittää TTY:n teknis-luonnontieteellisen tiedekunnan opintosuunnittelijaa Anna Pitkästä, joka oli suurena apuna tämän prosessin etenemisen aikana.

Tämän opinnäytetyön mittaukset ovat osa TAQIITA-projektia, jonka päätavoitteena on Intian kaupunki-ilman ja kansalaisten terveyden parantaminen. Projektin rahoittajia ovat Tekes, Pegasor, HSY, Dekati ja Neste. Mittaukset on suoritettu yhdessä TTY:n aerosolifysiikan laboratorion, Ilmatieteenlaitoksen, Metropolia ammattikorkeakoulun ilmanlaadun tutkimusyksikön henkilöstön kanssa. Haluan kiittää koko tiimiä mukavasta projektista ja hyvästä yhteistyöstä. Erityinen kiitos kuuluu Laura Salolle ja Heino Kuuluvaiselle, jotka olivat mukana mittauksissa ja auttoivat minua muutenkin työssä eteen päin. Kiitos myös Topi Rönkölle siitä, että luotit kykyihini, otit minut töihin ja valoit uskoa työn valmistumiseen rauhallisella olemuksellasi.

Viimeisenä, kiitos perheelle ja ystäville. Teidän tuellanne ja kannustuksellanne myös tämä niin kutsuttu ”kakkosdippa” on saatu päätökseen. Joko nyt saa juhlia?!

Tampereella, 22.11.2017

Matti Lassila

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	6
2.	TEORIA .....	8
2.1	Aerosolihiukkasten kokojakauma dieselmoottorin päästöissä .....	8
2.2	Aerosolihiukkasten varaus .....	9
2.2.1	Varatut hiukkaset ilmassa .....	9
2.2.2	Varatut hiukkaset päästöissä .....	11
2.3	Sähköiseen varaamiseen perustuvat mittalaitteet .....	12
3.	MITTAUKSET .....	16
3.1	eFilterin karakterisointimittaukset .....	16
3.1.1	Mittauslaitteisto .....	16
3.1.2	Mittausten kulku .....	19
3.1.3	Mittausdatan käsittely .....	21
3.2	Hiukkaspäästöjen sähköisen varauksen neutraloitumisen tutkiminen ohiajomittauksella .....	25
3.2.1	Mittausasetelma .....	25
3.2.2	Mittauslaitteisto .....	27
3.2.3	Mittausdatan käsittely .....	29
3.2.4	Tulosten laskenta .....	33
4.	EFILTERIN KARAKTERISOINTIMITTAUKSEN TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI .....	35
4.1	Perusmittaukset .....	35
4.2	Hiukkaspitoisuuden vaikutus .....	39
4.3	Alkuperäisen varauksen vaikutus .....	39
4.4	Mittaukset testiasetuksilla .....	40
5.	OHIAJOMITTAUSTEN TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI .....	42
5.1	CPC-laitteiden avulla saadut tulokset .....	42
5.2	eFilterin avulla saadut tulokset .....	46
6.	YHTEENVETO .....	50
	LÄHTEET .....	53

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

CPC	<i>condensation particle counter</i> on laite, jolla voidaan mitata näytteen sisältämien aerosolihiukkasten lukumääräpitoisuus.
DMA	<i>differential mobility analyzer</i> on laite, joka erottelee hiukkasia sähköisen liikkuvuuskoon perusteella
DOS	dioktyylisebakaatti
Euro IV	EU:n päästöluokituksen neljäs luokka
LDSA	lung-deposited surface area eli keuhkocodepositoituva pinta-ala. Yksikkö, joka kuvaa hiukkasten terveyshaittojen suuruutta
Nuuskija	Metropolian ammattikorkeakoulun auto, joka on suunniteltu päästömittausten tekemiseen
PM2.5	merkintätapa, jolla tarkoitetaan alle 2,5 mikrometrin kokoisia hiukkasia eli pienhiukkasia
SCAR	single charge aerosol reference on laitekokonaisuus, joka tuottaa hiukkasia, joilla on yksi alkeisvaraus
TAQIITA	Intian kaupunki-ilman ja kansalaisten terveyden parantamiseen pyrkivä projekti, jonka nimi englanniksi on traffic and air quality in India: technologies and attitudes
Tygon	eräs polymeeriletkutuoitemerkki
$a$	sovitekäyrän vakio
$A$	mittaussignaalin integroitu pinta-ala ajan suhteen (LDSA·s tai fA·s tai s/cm <sup>3</sup> )
$b$	sovitekäyrän vakio
$d_p$	hiukkasen liikkuvuuskoko (nm)
$e$	alkeisvaraus (C)
$F$	varattujen hiukkasten osuus hiukkasten kokonaispitoisuudesta
$I$	sähkövirta (fA)
$n$	hiukkasella olevien alkeisvarausten lukumäärä
$N_i$	bipolaarinen ionipitoisuus (1/cm <sup>3</sup> )
$N_p$	hiukkaspitoisuus (1/cm <sup>3</sup> )
$Pn$	sähköiseen varaamiseen perustuvan mittalaitteen toimintaa kuvaava suure, joka kertoo minkä varausluvun laitteeseen syötetty hiukkanen keskimäärin saa
$Q$	tilavuusvirta (m <sup>3</sup> /s)
$t$	aika (s)
$Z_i$	ionien sähköinen liikkuvuus (cm <sup>3</sup> /(V·s))
$\sigma$	keskihajonta

# 1. JOHDANTO

Ilmansaasteet ovat nykypäivänä yksi suurimmista ongelmista ihmiskunnalle. Kasvihuonekaasupäästöt kiihdyttävät tutkitusti ilmastomuutosta, joka vaikuttaa huomattavasti ympäristöön jossa elämme. Ilmansaasteilla on myös tutkitusti suoria terveysvaikutuksia ihmisiin. Erityisesti alle 2,5 mikrometrin kokoisten pienhiukkasten eli PM<sub>2,5</sub>-hiukkasten on todettu olevan terveydelle haitallisia ja aiheuttavan jopa ennenaikaisia kuolemia. State of Global Air-tutkimuksen mukaan yli 90 % maailman ihmisistä elää alueilla, joilla on epäterveellinen ilmanlaatu (State of Global Air 2017). Ilmanlaadun terveyshaitat ovat suurimpia tiheään asutuissa maissa, kuten Intiassa, jossa vuonna 2015 lähes 1,1 miljoonan kuoleman arvioitiin olevan ilman pienhiukkasten aiheuttamia (State of Global Air 2017). Yksi merkittävimmistä ilmanlaatuun vaikuttavista tekijöistä tiheään asutuissa kaupunkiympäristöissä on liikenne. New Delhissä vuonna 2013 suoritetuissa mittauksissa liikenteen pakokaasujen massaosuuden pienhiukkaspäästöistä arvioitiin olevan 16,2 % talvella ja 18,7 % kesällä (Pant et al. 2015). Erityisesti vanhempien, ilman hiukkassuodatinta kulkevien dieselajoneuvojen päästöt ovat terveydelle haitallisia ja merkittäviä hiukkaspäästöjen lähteitä.

Tämän opinnäytetyön mittaukset ja tulokset ovat osa TAQIITA-projektia (Traffic and air quality in India: technologies and attitudes), joka liittyy erityisesti Intian ilmanlaatuongelmiin. Projektissa pyritään mm. tutkimaan ja kehittämään uusia mittausturiratkaisuja sekä tutkimaan päästöjä. Tässä opinnäytetyössä keskitytään erityisesti hiukkaspäästöjen mittaustekniikkaan ja dieselmootoreiden aiheuttamiin hiukkaspäästöihin.

Ilmanlaatua ja pakokaasuja tutkittaessa oikeiden mittausturinstrumenttien valikointi on tärkeää, koska jokaisella mittalaitteella on omat rajoitteensa. Rajoittavia tekijöitä ovat mm. hiukkaskoko, hiukkaspitoisuus ja aikaresoluutio. Kullekin mittalaitteelle on olemassa sekä hiukkaskoko- että hiukkaspitoisuusalue, jonka sisällä sitä on mahdollista hyödyntää. Esimerkiksi dieselmootorin pakokaasuissa havaittavat nokihiukkaset ovat kooltaan tyypillisesti välillä 30 nm – 100 nm (Vu et al. 2015). Nokihiukkasten mittauksessa hyödynnettävän mittalaitteen on siis kyettävä mittaamaan hiukkasia kyseisen kokoalueen sisältä. Lisäksi päästöissä voi olla havaittavissa nukleaatiomoodi, jonka hiukkaset ovat tyypillisesti kokoalueella 5 – 50 nm sekä karkea moodi yli 1 µm hiukkaskokoalueella (Kittelson 1998; Vu et al. 2015).

Tässä opinnäytetyössä keskitytään kahteen pääteemaan: Sähköisen eFilter-hiukkasanturin toiminnan tutkimiseen erilaisissa tilanteissa sekä dieselmootorista aiheutuvien hiukkaspäästöjen sähköisesti varautuneiden hiukkasten osuuden mittaamiseen. Hiukkaspäästöjen mittaaminen sähköisillä antureilla on kiinnostavaa, koska niiden hinta on edullinen, ne toimivat reaaliajassa ja ne vaikuttaisivat soveltuvan hyvin juuri päästöjen sisältämien hiukkasten kokoluokan mittaamiseen. Dieselmootorin sähköisesti varatut hiukkaspäästöt

ovat kiinnostavia siksi, että niiden on havaittu sisältävän ilman taustapitoisuutta enemmän varattuja hiukkasia (Jayaratne et al. 2014; Lee et al. 2012). Tässä opinnäytetyössä tutkitaan sitä, kuinka kauan tämä ylimääräinen varaus säilyy, kun pakokaasu vapautuu ilmaan.

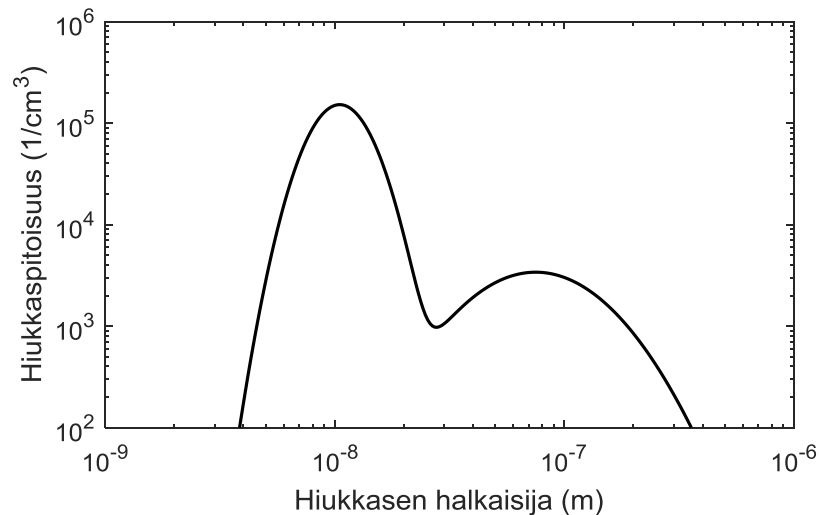


## 2. TEORIA

Tässä kappaleessa esitetty teoria painottuu aerosolihiukkasten kokojakaumaan ja sähköiseen varaukseen sekä sähköiseen varaukseen perustuvien aerosolimittalaitteiden toimintaan. Aerosolihiukkasten kokojakaumaa käsitellään kappaleessa 2.1. Kappaleessa 2.2 käydään läpi varattujen hiukkasten käyttäytymistä ja syntymistä ilmakehässä sekä kuluneuvojen päästöjen sisältämiä varattuja hiukkasia. Kappale 2.3 puolestaan käsittelee sähköiseen varaukseen perustuvien aerosolimittalaitteiden toimintaa.

### 2.1 Aerosolihiukkasten kokojakauma dieselmoottorin päästöissä

Aerosolihiukkasten koolla on merkittävä vaikutus niiden käyttäytymiseen, joten tutkittavien hiukkasten kokojakauman tuntemus on tärkeää. Hiukkaskoko on myös yksi merkittävistä tekijöistä aerosolihiukkasten varauksen kannalta. On havaittu, että dieselmoottorin pakokaasuille on olemassa tyypillinen hiukkaskokojakauma, josta on havaittavissa tilanteesta riippuen yksi tai kaksi huippua. Yksihiippuisen jakauman huippua kutsutaan nokimoodiksi. Kaksihiippuisen jakauman tapauksessa nokimoodin rinnalle muodostuvaa huippua kutsutaan nukleaatiomoodiksi. Kuvassa 1 on esitetty esimerkki mahdollisesta hiukkaskokojakauman muodosta.



**Kuva 1.** Esimerkki dieselmoottorin mahdollisesta hiukkaskokojakaumasta, jossa vasemmalla oleva huippu on nukleaatiomoodi ja oikealla oleva huippu on nokimoodi. Kuva piirretty mukailen lähdettä (Rönkkö et al. 2006).

Kuvassa 1 nukleaatiomoodi on havaittavissa vasemmalla ja nokimoodi sen vieressä oikealla. Kuten kuvasta havaitaan, nukleaatiomoodin pitoisuuden huippu voi olla huomattavasti nokimoodin huippua korkeammalla. Nukleaatiomoodin huippu on noin 10 nm hiukkaskokoon kohdalla ja nokimoodin huippu hieman yli 70 nm kohdalla. Kuvan 1 tapauksessa päästöjen hiukkaskokoalue on kokonaisuudessaan noin 4 nm ja 350 nm välissä. Hiukkaskokojakauman tarkka muoto on riippuvainen useasta seikasta. Siksi hiukkaskokojakauman leveys ja moodien huippujen paikat voivat vaihdella eri mittausten välillä. Nukleaatiomoodin hiukkaset ovat tyypillisesti kokoalueella 5 – 50 nm (Kittelson 1998; Vu et al. 2015). Nokimoodi on tyypillisesti havaittavissa hiukkaskokovälillä 30 – 100 nm (Vu et al. 2015).

## 2.2 Aerosolihiukkasten varaus

Sähkövarauksen yksikkönä käytetään fysiikassa yleisesti alkeisvarausta  $e$ . Sen arvo on noin  $1,602 \times 10^{-19}$  coulombia (Elementary charge 2017). Protonin varauksen suuruus on  $e$  ja elektronin varaus  $-e$ . Alkeisvaraus on käytännöllinen yksikkö, koska luonnossa havaittu varaus johtuu juuri yksittäisistä tai useammista elektroneista ja protoneista. Aerosolifysiikassa tarkasteltava yksittäisen hiukkasen kokonaisvaraus on usein niin pieni, että se ovat kätevästi esitettävissä alkeisvarauksen monikertana. Tämän vuoksi yksittäistä tai useampaa alkeisvarausta merkitään usein myös kokonaislukuarvoilla ( $\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$ ). Seuraavissa kappaleissa käsitellään tarkemmin varattuja aerosolihiukkasia ilmassa sekä päästöissä. (Hinds 1982)

### 2.2.1 Varatut hiukkaset ilmassa

Ilmassa olevat hiukkaset eivät aina ole neutraaleja. Hiukkaskoosta riippuen, neutraalien hiukkasten osuus ilmasta normaaliolosuhteissa voi olla todella vähäinen. Ilmaan syntyy jatkuvasti suunnilleen yhtä suuri määrä positiivisia ja negatiivisia ioneja kosmisen säteilyn ja maassa tapahtuvien radioaktiivisten hajoamisten lähettämän säteilyn seurauksena. Satunnaisen lämpöliikkeen vuoksi nämä ionit törmäilevät ilmassa olevien hiukkasten kanssa. Tässä prosessissa myös ionin varaus pääsee siirtymään alun perin neutraaleille hiukkasille, jolloin myös uusia varattuja hiukkasia syntyy jatkuvasti. Hiukkasen saama varaus ei kuitenkaan ole pysyvä. Varatut hiukkaset vetävät puoleensa ioneja, joilla on vastakkainen varaus. Vetovoiman aiheuttaman törmäyksen seurauksena hiukkaset menettävät hiljalleen saamansa varauksen. Varattuja hiukkasia siis syntyy ja poistuu jatkuvasti, jolloin ilmassa on olemassa tietty tasapainotilanne sille, kuinka monta varattua hiukkasta se sisältää. Tätä kutsutaan Boltzmannin tasapainoksi. (Hinds 1982)

Hiukkasten kyky vastaanottaa varauksia on yhteydessä niiden kokoon. Pienet hiukkaset kykenevät vastaanottamaan enimmillään ainoastaan yhden varauksen, suuret puolestaan

useampia. Jokaisen hiukkaskoon varausten lukumäärälle on olemassa oma todennäköisyysjakaumansa. Taulukossa 1 on esitetty eri suuruisten varauslukujen todennäköisyydet eri kokoisille hiukkasille Boltzmannin tasapainotilassa. (Hinds 1982)

**Taulukko 1.** Eri kokoisten hiukkasten varautumistodennäköisyysjakaumat sekä keskimääräinen varautumisluku (Hinds 1982).

Hiukkaskoko ( $\mu\text{m}$ )	Keskimääräinen varaus	Prosenttiosuus hiukkasista, joka kantaa alla ilmoitetun määrän varaus								
		< -3	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	> +3
0,01	0,007				0,3	99,3	0,3			
0,02	0,104				5,2	89,6	5,2			
0,05	0,411			0,6	19,3	60,2	19,3	0,6		
0,1	0,672		0,3	4,4	24,1	42,6	24,1	4,4	0,3	
0,2	1,00	0,3	2,3	9,6	22,6	30,1	22,6	9,6	2,3	0,3
0,5	1,64	4,6	6,8	12,1	17,0	19,0	17,0	12,1	6,8	0,3
1,0	2,34	11,8	8,1	10,7	12,7	13,5	12,7	10,7	8,1	11,8
2,0	3,33	20,1	7,4	8,5	9,3	9,5	9,3	8,5	7,4	20,1
5,0	5,28	29,8	5,4	5,8	6,0	6,0	6,0	5,8	5,4	29,8
10	7,47	35,4	4,0	4,2	4,2	4,3	4,2	4,2	4,0	35,4

Taulukosta 1 havaitaan, että positiivisesti ja negatiivisesti varautuneiden hiukkasten prosenttiosuudet ovat teorian mukaan samat. Itseasiassa voidaan sanoa myös, että hiukkasen varauslukua kuvaava käyrä on normaalijakautunut, kun hiukkaskoko on yli 0,1  $\mu\text{m}$ .

Aerosolit pyrkivät kohti Boltzmannin tasapainotilaa, kun ne ovat ilmakehässä. Kun aerosoli saavuttaa tasapainotilan, kutsutaan tätä tapahtumaa neutralisaatioksi. Neutralisaatio tapahtuu ilmakehässä luonnollisesti, mutta se voidaan myös tehdä keinotekoisesti esimerkiksi radioaktiivisten lähteiden avulla. Neutralisaatiotapahtuman etenemistä voidaan kuvata yhtälöllä:

$$\frac{n(t)}{n_0} = \exp(-4\pi e Z_i N_i t) \quad (1)$$

jossa  $n(t)$  kuvaa hiukkasella olevien varausten määrää ajan  $t$  jälkeen kun se on altistettu bipolaariselle ionipitoisuudelle  $N_i$ . Yhtälössä  $n_0$  on hiukkasella olevien varausten määrää

hetkellä  $t = 0$  ja  $Z_i$  on ionien sähköinen liikkuvuus. Normaalisti ilmassa  $N_i$  on noin  $1000 \text{ 1/cm}^3$  ja  $Z_i$  on noin  $450 \text{ cm}^2/\text{stV}\cdot\text{s}$ . Yhtälöstä 1 nähdään, että neutraloitumisvauhti ei ole riippuvainen hiukkasen koosta tai alkuperäisestä varaustilasta. Yhtälöstä 1 voidaan myös ratkaista aika, joka neutralisaatioon kuluu. Ilmakehässä täydelliseen neutralisoitumiseen kuluva aika normaaliolosuhteissa on noin 100 minuuttia. (Hinds 1982)

## 2.2.2 Varatut hiukkaset päästöissä

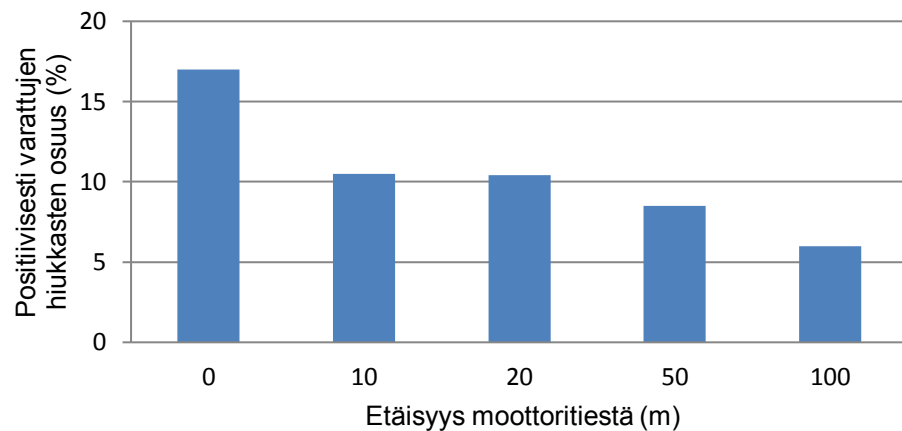
Bensiinillä ja dieselillä kulkevat ajoneuvot tuottavat pakokaasujensa mukana myös hiukaspäästöjä. Merkittävät hiukaspäästöt ovat erityisesti vanhoille dieselautoille tyypillinen ongelma. Tämän vuoksi tässä kappaleessa käsitellään erityisesti dieselmoottoreissa syntyviä hiukkasia.

Matti Mariqin vuonna 2006 tekemässä tutkimuksessa tarkasteltiin  $64 \text{ km/h}$  sekä  $112 \text{ km/h}$  vakionopeudella kulkevan dieselauton synnyttämien pakokaasujen hiukkasia ja havaittiin, että noin  $60 - 80 \%$  niistä ovat varattuja. Kuten ilmassakin, pakokaasuissa olevien hiukkasten varaukset ovat jakautuneet niin, että pakokaasut sisältävät suunnilleen yhtä paljon positiivisesti ja negatiivisesti varautuneita hiukkasia. Tutkimuksessa havaittiin myös, että vakioidulla hiukkaskoolla hiukaspäästöjen varausjakauma noudattaa Boltzmannin jakaumaa lämpötilavälillä  $800 - 1000 \text{ K}$ . Tutkimuksessa havaittiin myös, että hiukkaskokojakauma sekä koko hiukkasjoukolle, että varatuille hiukkasille on yksimoodinen  $64 \text{ km/h}$  vauhdissa. Jakauman huippu kyseisessä mittauksessa oli  $57 \text{ nm}$ , joka on tyypillinen koko kyseisissä olosuhteissa syntyneille nokihiukkasille. Tästä syystä kyseistä moodia kutsutaan myös nokimoodiksi. Nopeudella  $112 \text{ km/h}$  tehdyistä mittauksista esitettiin tutkimuksessa kaksi toistoa, joista molemmissa hiukkaskokojakauma muodostui kaksimoodiseksi. Ns. nukleaatiomoodi muodostui alle  $5 \text{ nm}$  hiukkaskoolle ja nokimoodi  $38 \text{ nm}$  hiukkaskoolle. Kyseisellä nopeudella tehdyissä mittauksissa merkittävää oli se, että varattujen hiukkasten kokojakaumasta toinen muodostui kaksimoodiseksi, mutta toinen ei. Syytä tähän ei tutkimuksessa osattu sanoa. (Mariq 2006)

Dieselautojen hiukaspäästöjen on huomattu sisältävän keskimäärin enemmän varauksellisia hiukkasia kuin taustailma (Jayaratne et al. 2014; Lee et al. 2012). Myös hiukkasten varausluku on keskimäärin suurempi dieselautojen pakokaasuhiukkasilla kuin ilman sisältämällä hiukkasilla. Esimerkiksi  $30 \text{ nm}$  kokoisten dieselpäästöhiukkasten on havaittu kantavan kaksinkertaista varausta taustailmaan verrattuna (Jayaratne et al. 2014). Tämä tarkoittaa sitä, että ympäröivään ilmaan saapuessaan pakokaasuhiukkasjoukko pyrkii kohti ympäröivän ilman määrittämää varaustasapainoa. Pakokaasuhiukkaset alkavat siis neutraloitua. Täydellinen neutraloituminen ei tapahdu kovin nopeasti. Eräissä moottoritien varrella suoritetussa tutkimuksessa havaittiin kohonneita varattujen hiukkasten pitoisuuksia jopa  $400 \text{ m}$  päässä tiestä (Jayaratne et al. 2014).

Toisessa tutkimuksessa selvitettiin tarkemmin, kuinka varattujen hiukkasten osuus muuttuu etäisyyden funktiona. Kuvassa 2 on esitetty  $80 \text{ nm}$  kokoisten positiivisten hiukkasten

osuuden muutosta etäisyyden funktiona. Pystyakseli kuvaa positiivisesti varautuneiden hiukkasten osuutta kaikista mitatuista hiukkasista ja vaaka-akseli etäisyyttä moottoritiestä, jonka varrella mittaukset suoritettiin. (Lee et al. 2012)



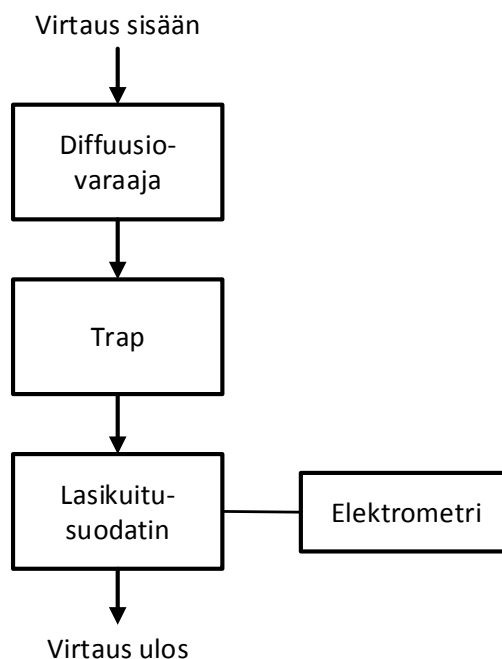
**Kuva 2.** Moottoritien varrella mitattujen 80 nm kokoisten positiivisesti varattujen hiukkasten osuuden muutos etäisyyden funktiona. Kuva on piirretty tutkimuksen (Lee et al. 2012) tuloksista.

Kuvasta 2 havaitaan selkeästi, että positiivisesti varattujen hiukkasten osuus vähenee etäisyyden kasvaessa. Etäisyydellä 0 m positiivisesti varattujen hiukkasten osuus on noin 17% ja etäisyydellä 100 m vastaava osuus on noin 6 %. Varattujen hiukkasten osuuden väheneminen vaikuttaisi olevan nopeaa välillä 0 – 10 m ja hidastuvan ajan kuluessa ja etäisyyden kasvaessa. Kuvaa 2 tulkitessa on erityisesti huomattavaa se, että se koskee ainoastaan positiivisesti varattuja hiukkasia. Lee et al. tekemässä tutkimuksessa 80 nm hiukkaskoolla havaittiin, että negatiivisesti varautuneita hiukkasia oli päästöissä lähes yhtä paljon. Varattujen hiukkasten kokonaisosuus oli tutkimuksessa noin 30 % etäisyydellä 0 m. Kyseinen osuus poikkeaa huomattavasti Mariqin tutkimuksessa saadusta tuloksesta, jossa vastaava osuus oli 60 – 80 %. Huomattavaa tässä on kuitenkin se, että Mariqin tutkimukset suoritettiin laboratoriossa ja Kuvassa 2 esitetyt tulokset on saatu moottoritien varrella tehdyistä mittauksista. Lee et al. tulosten mukaan 80 nm kokoisten varattujen hiukkasten kokonaisosuus taustassa oli alle 10 %. Tämä tulos poikkeaa huomattavasti Boltzmannin tasapainon osoittamasta osuudesta. Boltzmannin tasapainoa kuvaavassa Taulukossa 1 varattujen hiukkasten kokonaisosuus on 50 nm kokoisille hiukkasille 39,8 % ja 100 nm kokoisille hiukkasille 57,4 %. Lee et al. esittävät poikkeamisen syyksi tutkimuksessaan sitä, että teoriassa hiukkaset oletetaan pallon muotoisiksi, vaikka todellisuudessa ne usein agglomeroituvat monimuotoisemmiksi geometrioiksi. Lisäksi mainittiin, että hiukkaset eivät vielä olleet saavuttaneet Boltzmannin tasapainotilaa kyseisellä etäisyydellä.

## 2.3 Sähköiseen varaamiseen perustuvat mittalaitteet

Aerosolihiukkasia voidaan mitata usealla tavalla. Näitä menetelmiä ovat mm. hiukkasten kerääminen ja niiden massan analysointi, hiukkasten optinen havainnointi sekä varattujen hiukkasten mittausta. Tässä kappaleessa syvennyttään tarkemmin yhteen tapaan tehdä sähköiseen varaamiseen perustuvaa mittausta käyttäen eFilter-mittalaitetta malliesimerkinä. eFilterillä on mahdollista myös tehdä hiukkasten keräykseen perustuvaa mittausta, mutta sitä ei tässä työssä käsitellä.

Sähköiseen varaukseen perustuva hiukkasten mittaaminen suoritetaan tavanomaisesti kolmivaiheisen prosessin kautta. Ensin hiukkaset varataan tunnetulla varausjakaumalla. Tämän jälkeen aerosolista poistetaan ionit ja viimeisenä mitataan varattujen hiukkasten aiheuttaman sähkövirran suuruus. Kuvassa 3 on esitetty eFilterin toimintaperiaate. Edellä mainitut vaiheet tapahtuvat kuvaan merkityissä kolmessa päällekkäisessä laatikossa, jotka ovat diffuusiovaraaja, trap ja lasikuitusuodatin.



**Kuva 3.** Aerosolihiukkasten sähköiseen varaukseen perustuvan eFilter-mittalaitteen toimintaperiaate esitettynä kaavion muodossa. Kuvassa laatikot ovat mittalaitteen eri komponentteja ja nuolet kuvaavat aerosolin virtausta. (Dekati Ltd 2017)

Hiukkaset voivat saada varauksen kolmella eri mekanismilla, jotka ovat staattinen sähköistyminen, diffuusiovarautuminen ja kenttävarautuminen. Näistä mekanismeista eFilter hyödyntää diffuusiovarautumista (Dekati Ltd 2017). Diffuusiovarautumisessa unipolaaristen ionien kanssa sekoittuneet hiukkaset varautuvat ionien kanssa tapahtuvien satunnaisten törmäysten seurauksena. Prosessia kutsutaan diffuusiovarautumiseksi, koska

törmäykset johtuvat Brownin liikkeestä. Diffuusiovaraajissa ionien tuottaminen tapahtuu elektrodin ja hiukkasten välisten hetkellisten koronapurkausten tai jatkuvan elektrodien välisen valokaaren avulla. Varaaja sisältää tyypillisesti kaksi erillään olevaa elektrodia, jotka voivat olla neula ja levy tai vaihtoehtoisesti putki, jonka sisällä on lanka. Elektrodien välille synnytetään hyvin suuri sähkökenttä, joka mahdollistaa läpilyönnin niiden välisen eristeen läpi. Eristeenä elektrodien välillä on tyypillisesti ilmaa tai muuta kaasua. Läpilyönnin muoto riippuu elektrodien välillä olevan sähkökentän geometriasta. Putken ja langan tapauksessa elektrodien välille syntyy sähkökenttä, joka on voimakkaampi lähellä lankaa ja heikompi lähellä putken sisäpintaa. Tällöin läpilyönti on mahdollinen ainoastaan voimakkaan kentän alueella eli lähellä lankaa. Tätä aluetta kutsutaan korona-alueeksi. Korona-alueella syntyy ioneja. Tämä tapahtuu niin, että voimakkaan sähkökentän kiihdyttämät elektronit törmäävät kaasumolekyyleihin ja irrottavat niiltä elektronin. Korona-alueella tapahtuvien ionien muodostus on jatkuvaa, jolloin varaajien läpi kulkevien hiukkasten varautuminen on myös jatkuva prosessi ja aiheuttaa hiukkasille tunnetun hiukkaskoosta riippuvan keskimääräisen varauksen. Mitä suurempia hiukkaset ovat, sitä enemmän varausta ne voivat ottaa vastaan. eFilterissä varaaja tuottaa positiivisesti varattuja hiukkasia varaajassa, jonka jännite on 2.5 kV ja koronavirta on 1  $\mu$ A (Dekati Ltd 2017). (Hinds 1982)

Koronavaraajan jälkeen laitteen läpi kulkeneessa aerosolissa on sekä ioneja että varautuneita hiukkasia. Jotta sähkövirran mittausta koskisi ainoastaan hiukkasia, on ionit poistettava aerosolista. Tämä tapahtuu ns. trapin tai trap-jännitteen avulla. Trap-jännite synnyttää sähkökentän, joka on juuri tarpeeksi voimakas poistamaan sen läpi kulkevasta aerosolista ionit, mutta ei mitattavia hiukkasia (Dhaniyala et al. 2011). eFilterissä trap-jännitteen arvoa on mahdollista säätää välillä 10 – 60 V. Alarajalla 10 V näytteestä poistuu ionit sekä alle 5 nm kokoiset hiukkaset. Ylärajalla 60 V puolestaan poistuu ionien lisäksi alle 13nm kokoiset hiukkaset (Dekati Ltd 2017).

Sähköiseen varautumiseen perustuvissa antureissa mitattava virta on yhteydessä sen läpi kulkevien hiukkasten pitoisuuteen. Sähkövirran mittausta voi tapahtua esimerkiksi pienen johtavasta materiaalista valmistetun Faradayn häkin ja elektrometrin avulla. Kyseisessä mittaustavassa faradayn häkin ja sen sisällä olevan suodattimen läpi kulkevat hiukkaset indusoivat häkkiin sähkövirran, joka on riippuvainen hiukkasten kantamasta varauksesta. Kyseinen virta voidaan mitata elektrometrin avulla. eFilterissä vastaava prosessi tapahtuu lasikuitusuodattimen ja elektrometrin avulla (Dekati Ltd 2017). (Dhaniyala et al. 2011)

Sähköiseen varaamiseen perustuvan mittalaitteen toimintaa voidaan kuvata ns.  $Pn$ -arvon avulla.  $Pn$ -arvo koostuu kahden eri suureen tulosta.  $P$  kuvaa hiukkasten läpäisytodennäköisyyttä varaajan läpi ja  $n$  kuvaa hiukkasten keskimääräistä varausta varaajan jälkeen. Tuloa käsitellään kuitenkin yhtenä suureena, koska laitteen vasteen avulla ei saada suureiden  $P$  ja  $n$  arvoja erikseen ilman lisämittauksia.  $Pn$ -arvo mittalaitteelle voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä (Dhaniyala et al. 2011):

$$Pn = \frac{I}{eQN_p} \quad (2)$$

jossa  $I$  on mittalaitteen ilmoittama sähkövirta,  $e$  on alkeisvaraus,  $Q$  on laitteen läpi kulkeva tilavuusvirta ja  $N_p$  on aerosolihiukkasten lukumääräpitoisuus. Yhtälössä  $I$  on hiukkaskoosta riippuva suure, joten myös  $Pn$ -arvo on hiukkaskoosta riippuvainen. Laitteen toiminnan kuvaamiseen eri kokoisilla hiukkasilla käytetään tästä syystä tyypillisesti hiukkaskoosta riippuvaa sovitetta, joka on muotoa:

$$Pn = ad_p^b \quad (3)$$

jossa  $a$  ja  $b$  ovat vakioita ja  $d_p$  on hiukkasen halkaisija. Kirjallisuudessa diffuusiovaraajaa hyödyntäville erilaisille laitteille on saatu vakion  $b$  arvoja väliltä 1,11 – 1,91 (Dhaniyala et al. 2011).



### 3. MITTAUKSET

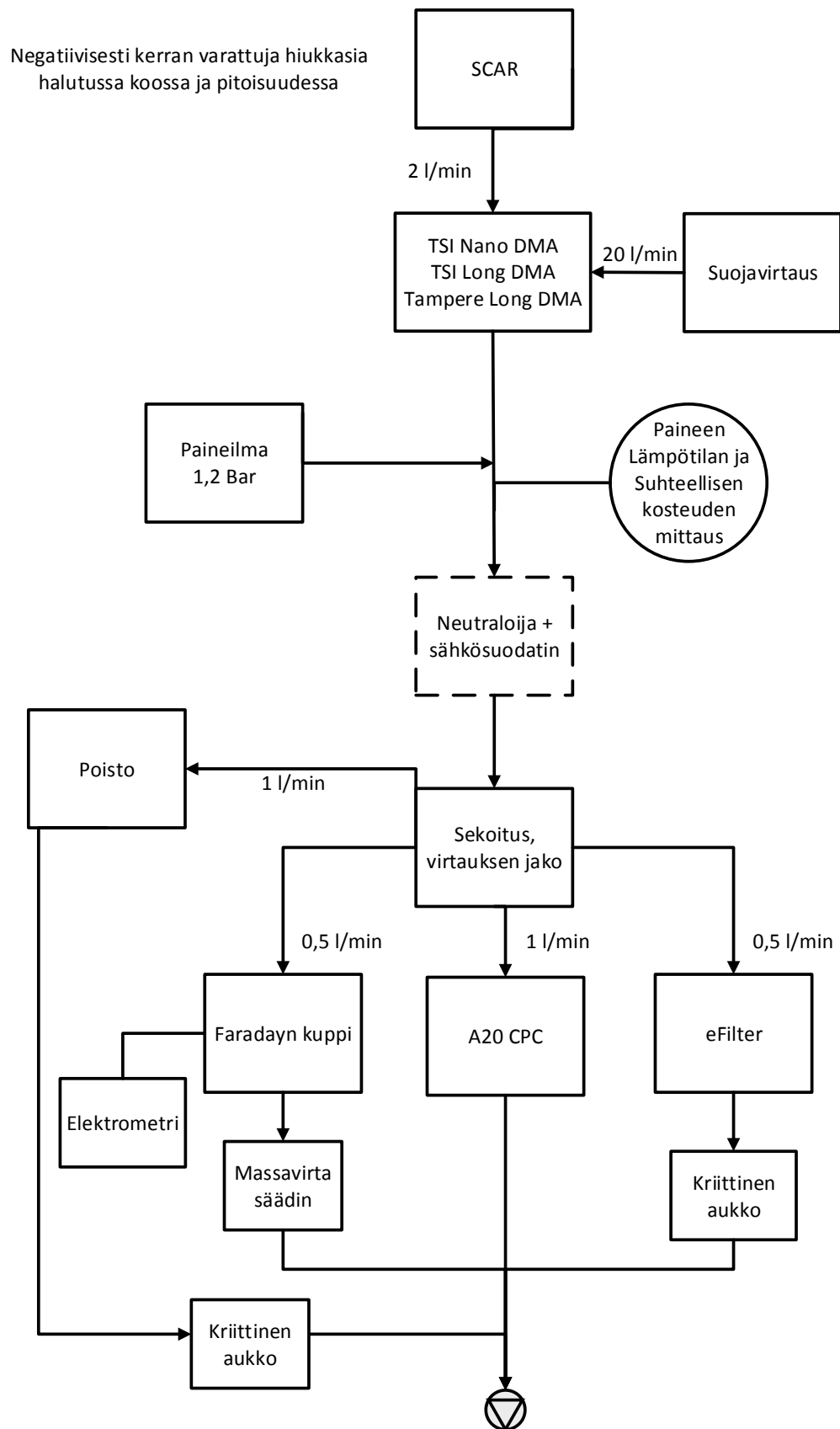
Tässä työssä suoritettiin mittaukset kahdessa eri vaiheessa. Ensimmäisenä suoritettiin eFilterin karakterisointi Tampereen teknillisen yliopiston laboratoriossa. Tämän jälkeen testasimme eFilteriä kenttäolosuhteissa ja tutkimme dieselmoottorin hiukkaspäästöjen sähköisen varauksen neutraloitumista ohiajomittauksella Alastarossa.

#### 3.1 eFilterin karakterisointimittaukset

Tutkimuksen ensimmäinen vaihe oli hiukkasten sähköiseen varaukseen perustuvan eFilter-mittalaitteen toiminnan karakterisointi, jonka avulla selvitimme laitteen soveltuvuutta päästömittauksiin. Karakterisointimittausten tarkoituksena oli ensisijaisesti saada selville eFilterin Pn-käyrä. Pn-käyrän avulla saadaan tietoa siitä, kuinka laite toimii eri kokoisia hiukkasia mitattaessa. Tämän lisäksi tutkimme hiukkaspitoisuuden sekä mitattavien hiukkasten varauksen vaikutusta mittauksiin. Kokeilimme käyttää laitetta myös ns. testiase-  
tuksilla, jolloin laitteen läpi kulkeva tilavuusvirta ja trap-jännite poikkesivat normaalista.

##### 3.1.1 Mittauslaitteisto

Karakterisointimittaukset suoritettiin Tampereen teknillisen yliopiston aerosolifysiikan laboratoriossa. Kaaviokuva mittauksissa käytetyistä laitteista on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 4.** eFilterin karakterisointimittausten mittausasetelma.

Kuvassa 4 laitteisto on esitetty niin, että ylhäällä on laitteiston alkupää, josta virtaukset sekä hiukkaset lähtevät. Alhaalla on puolestaan poistopumppu, jonka kautta aerosoli poistuu. Kuvassa ylimpänä laitteena on SCAR, joka tuottaa negatiivisesti kerran varattuja hopeahiukkasia, jotka voidaan kasvattaa haluttuun kokoon. Hiukkasten koko ennen kasvatamista on noin 10nm. Hiukkasten kasvattaminen tapahtuu siten, että ne kulkevat SCARin komponentin läpi, jossa niiden ympärille tiivistyy DOS:ia eli dioktyylisebakaattia. (Yli-Ojanperä et al. 2010)

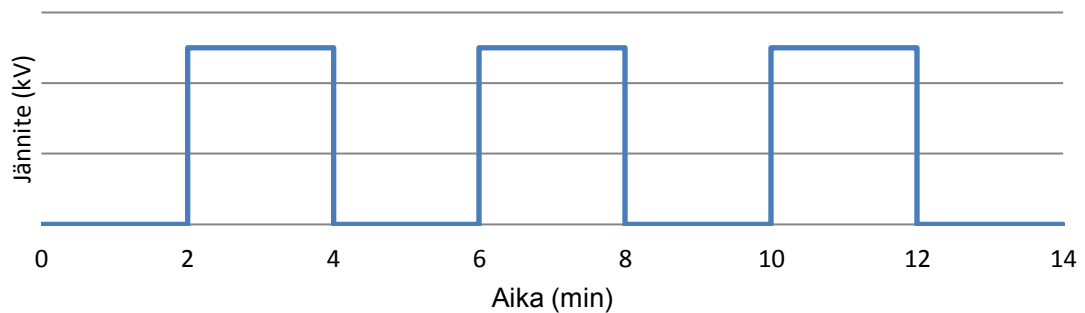
Kasvattamisen jälkeen aerosoli kulkee DMA:n (Differential mobility analyzer) läpi, joka päästää läpi vain tietyn sähköisen liikkuvuuskoon omaavia hiukkasia. Koska näyteaerosolissa kaikkien hiukkasten varaus on sama, niin tässä tapauksessa DMA:n läpi kulkevat hiukkaset ovat myös tietyn kokoisia. DMA:n toiminnan kannalta olennainen osa on suojavirtaus, joka pidettiin mittauksen aikana vakiona. Näissä mittauksissa käytössä oli kolme eri hiukkaskokoalueille soveltuvaa DMA:ta, jotka olivat TSI Nano, Vienna Long sekä Tampere Long.

Tämän jälkeen kuvaan on merkitty katkoviivalla neutraloija sekä sähkösuodatin. Katkoviiva tarkoittaa sitä, että tämä yhdistelmä on käytössä ainoastaan neutraaleja hiukkasia mitattaessa. Neutraloijan tarkoituksena on nimensä mukaisesti luoda neutraaleja hiukkasia näytteeseen. Neutraloijana mittauksissa käytettiin radioaktiivista lähdettä, jonka läpi kulkiessaan aerosolin hiukkasista osa varautuu positiivisesti, osa negatiivisesti ja osa neutraloituu. Neutraloijan jälkeinen sähkösuodatin puolestaan suodattaa pois sekä positiivisesti että negatiivisesti varatut hiukkaset, jolloin jäljelle jää ainoastaan neutraaleja yhden kokoisia hiukkasia.

Mittauksissa haluttiin varmistaa, että kullekin mittalaitteelle tuleva aerosoli on mahdollisimman samanlaista. Tämän vuoksi aerosoli johdettiin sekoittajaan, jonka jälkeen virtaus jaetaan neljään haaraan, jotka johtavat mittalaitteille sekä poistoon. Lisäksi kullekin mittalaitteelle johtavat linjat pidettiin keskenään yhtä pitkinä sekä mahdollisimman lyhyinä, jotta linjoissa vaikuttavat häviöt eivät loisi eroa eri mittalaitteille saapuvaan aerosoliin. Käytetyt mittalaitteet olivat eFilter, CPC sekä elektrometrillä varusteltu Faradayn kuppi. Mittalaitteet, sekä poistolinjat olivat yhteydessä tyhjiöpumppuun, jonka vuoksi niiden virtauksen säätö oli tehtävä erikseen. eFilterin sekä poistolinjan läpi kulkeva virtaus säädettiin sopivaksi lukittavilla venttiileillä, jotka toimivat kriittisinä aukkoina. CPC:n läpi kulkeva virtauksen säätö tapahtui laitteen sisäisen kriittisen aukon avulla. Faradayn kupin puolestaan säädettiin halutuksi massavirtasäätimen avulla. Tilavuusvirta säädettiin mahdollisimman tarkasti arvoon 0.5 l/min eFilterille sekä Faradayn kupille. CPC:n läpi kulki 1 l/min ja poistoon noin 1.5 l/min. Nämä virtaukset pidettiin samana kaikissa muissa paitsi testiasetuksilla suoritetuissa mittauksissa, joissa kaikkiin laitteisiin sekä poistoon säädettiin tilavuusvirta 1 l/min.

### 3.1.2 Mittausten kulku

Kussakin mittauksessa mittausdata pyrittiin keräämään samaa kaavaa noudattaen. Kunkin päivänä mittauslaitteisto laitettiin päälle aamulla, jonka jälkeen se pidettiin päällä mitauspäivän loppuun asti. Mittalaitteille tulevat tilavuusvirtaukset sekä mitattavan aerosolin lämpötila, paine ja suhteellinen kosteus mitattiin ja kirjattiin ylös joka päivä minimissään kaksi kertaa. Mittaukset toistettiin aina aamulla ennen mittausten aloittamista sekä mitauspäivän päätteeksi. Lisäksi mittaukset tehtiin, jos havaitsimme odottamatonta käytöstä mittauslaitteistoltamme tai jos teimme siihen muutoksia. Varsinainen mitattava data kerättiin aina yksittäiselle hiukkaskoolle kerrallaan 14 minuutin mitaussykkeissä. Tuon syklin aikana DMA:n jännitettä ohjattiin tietokoneella siten, että se vaihteli nollan ja määritetyn vakioarvon välillä 2 minuutin välein. Kun DMA:n jännite oli nollassa, niin se ei päästänyt SCAR:ilta tulevia varattuja hiukkasia läpi ollenkaan. Vakiojännitteen suuruus puolestaan valittiin kuhunkin mittaukseen niin, että juuri haluttu hiukkaskoko läpäisi DMA:n ja jatkoi matkaansa mittalaitteille. Kuvassa 5 on esitetty mittauksissa käytetty yksittäinen mitaussykli.



**Kuva 5.** Esimerkki mittauksissa käytetystä mitaussyklistä. Kuvassa on esitetty DMA:n jännite ajan funktiona.

Kuvasta 5 nähdään, että sykli alkaa kahden minuutin kestoisella jaksolla, jonka aikana DMA:n jännite on nolla. Tämän jälkeen DMA:n jännite nostetaan äkillisesti haluttuun vakioarvoon kahden minuutin ajaksi ennen jännitteen laskemista takaisin nolnaan. Jännitteen nosto ja lasku toistetaan kolme kertaa, jonka jälkeen jännite jätetään arvoon nolla.

Mittauksissamme tutkimme neljää eri kokonaisuutta: eFilterin toimintaa perusasetuksilla, hiukkaspitoisuuden ja hiukkasten alkuperäisen varauksen vaikutusta mittauksiin sekä eFilterin toimintaa testiasetuksilla. Eri mittausten tärkeimmät tiedot on koottu Taulukoon 2.

**Taulukko 2.** Eri mittausasetukset eFilterin karakterisointimittauksissa kullekin mittausosiolle.

	Hiukkas- koko (nm)	Hiukkaspitoisuus (1/cm <sup>3</sup> )	Varaus /hiukkanen	Käytetty DMA	eFilter asetukset
<b>Perusmittaus</b>	11 - 2500	10000	-1	TSI Nano, Vienna Long, Tampere Long	Oletus
<b>Hiukkaspitoisuuden vaikutus</b>	100	1000- 50000	-1	Vienna Long	Oletus
<b>Alkuperäisen varauksen vaikutus</b>	20 - 100	10000	0	Vienna Long	Oletus
<b>Testiasetukset</b>	11 - 500	4500- 15000	-1	TSI Nano, Vienna Long	Testi- asetukset

Taulukon 2 vasemmanpuolimmainen pystypalkki kertoo mittauksen tyypin ja ylin palkki kertoo mittauksissa muuttuvien parametrien tiedot. Seuraavissa kappaleissa esitellään tarkemmin sitä, kuinka mittauksen parametrit ja hyödynnetty laitteisto vaihtelivat eri mitausten välillä.

### Perusmittaus

Perusmittauksessa tarkoituksena oli kattaa mahdollisimman laaja hiukkaskokoalue sellaisella hiukkaspitoisuudella, jolla eFilteriä tyypillisesti voitaisiin käyttää. Hiukkaspitoisuudeksi tähän mittaukseen valikoitui 10000 1/cm<sup>3</sup>. Mitattujen aerosolihukkasten halkaisijat olivat välillä 11 – 2500 nm. Laajan kokoalueen vuoksi mittauksissa hyödynnettiin kolmea eri kokoalueelle soveltuvaa DMA:ta, jotka olivat TSI Nano, Vienna Long sekä Tampere long. TSI Nanaa hyödynsimme halkaisijaltaan 11 – 20 nm hiukkasten mittaamisessa, Vienna Long:ia halkaisijaltaan 20 – 500 nm hiukkasten mittaamisessa ja Tampere Long:ia 500 – 2500 nm hiukkasten mittaamisessa. Tarkat hiukkaskoot, joilla mittaussykli toteutettiin, olivat 11, 15, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 300, 500, 1000, 1500 ja 2500 nm. Mitattujen hiukkasten varaus oli -1e. eFilterin läpi kulkeva tilavuusvirta oli 0,5 l/min, koronavirta 1 µA ja trap-jännite 10,4 V. Näitä asetuksia kutsutaan tässä työssä eFilterin oletusasetuksiksi.

### Hiukkaspitoisuuden vaikutuksen mittaaminen

Tässä mittauksessa tarkoituksena oli selvittää, onko aerosolin hiukkaspitoisuudella vaikutusta eFilterin mittaustulokseen. Tämä toteutettiin niin, että hiukkaskoko pidettiin mitausten ajan vakiona ja hiukkaspitoisuutta muutettiin eri mittaussykliä välillä. Tuotettu hiukkaskoko oli 100 nm ja aerosolin hiukkaspitoisuutta muutettiin välillä 1000-50000

$1/\text{cm}^3$ . Mittauksissa käytetty DMA oli Vienna Long ja hiukkasten varaus oli  $-1e$ . eFilteriä käytimme sen oletusasetuksilla.

### **Alkuperäisen varauksen vaikutus**

Tämän mittauksen tarkoituksena oli tutkia mittalaitteille tulevien hiukkasten varauksen vaikutusta mittaustuloksiin. Käytännössä tutkimme, toimiiko eFilter samalla tavalla, kun mitattavat hiukkaset ovat mittalaitteille tullessaan kerran varattujen sijasta sähköisesti neutraaleja. Hiukkaspitoisuutena mittauksessa käytettiin samaa pitoisuutta kuin perusmittauksessa, eli  $10000\ 1/\text{cm}^3$ . Mitattujen hiukkasten halkaisijat vaihtelivat välillä 20 – 100 nm, joten pystyimme suorittamaan kaikki mittaukset Vienna Long DMA:ta hyödyntäen. Ainoastaan tässä mittauksessa Kuvaan 4 katkoviivalla merkityt osat, eli neutraloija ja sähkösuodatin olivat käytössä. Sähkösuodattimessa käytimme jännitettä 3 kV. Tarkistimme ennen mittaussykliä aloittamista, että tämä riittää kaikkien varattujen hiukkasten poistamiseen, jolloin mittauslaitteille kulkeutui ainoastaan neutraaleja hiukkasia. eFilteriä käytimme tässäkin mittauksessa sen oletusasetuksilla.

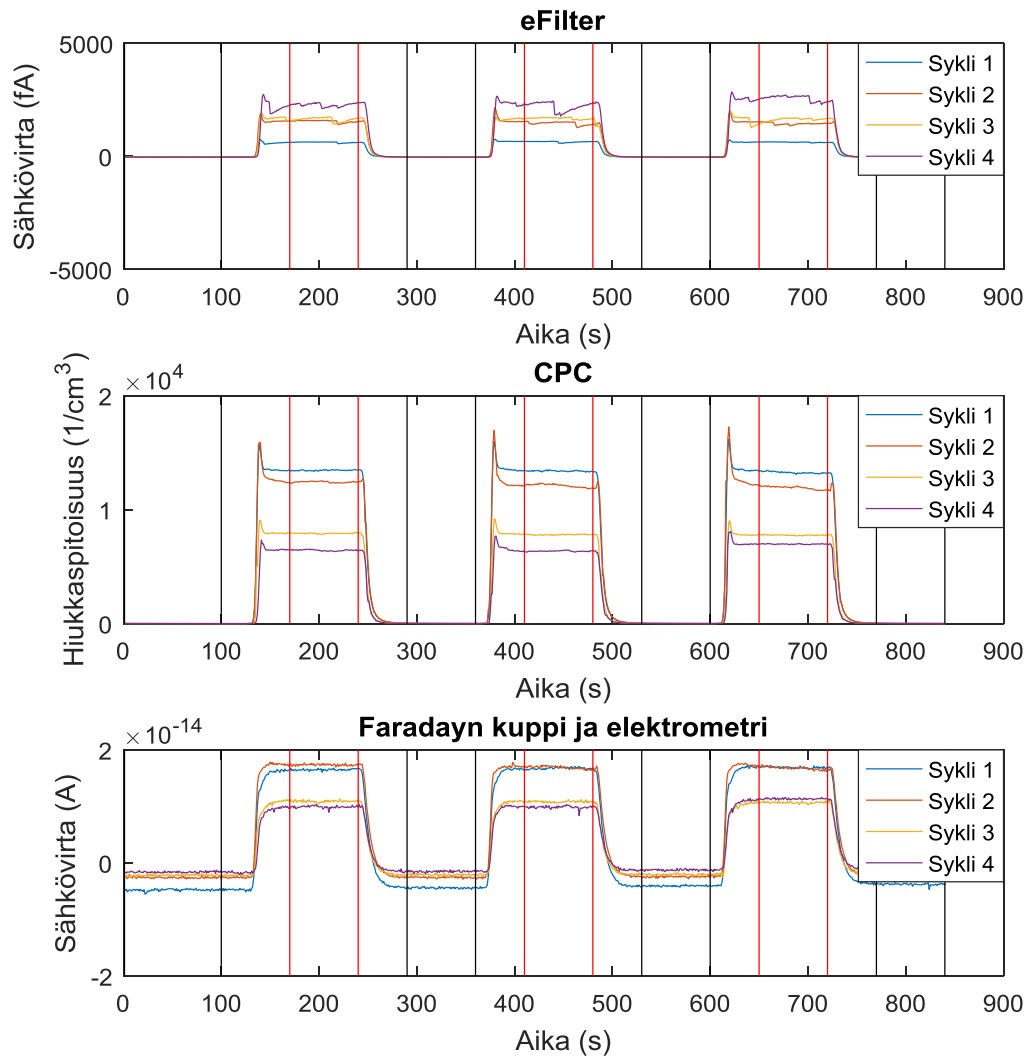
### **Mittaaminen testiasetuksilla**

Testiasetuksilla mittaamisen tarkoituksena oli saada selville, onko eFilteriä mahdollista käyttää, kun sen läpi johdetaan suurempi tilavuusvirta. Tämä oli olennainen tieto siksi, että halusimme käyttää eFilteriä kenttämittauksissa yhdessä sähkösuodattimen kanssa, joka on mitoitettu tilavuusvirtaukselle  $1\ \text{l/min}$ . Tästä syystä ns. testiasetuksilla eFilterin läpi kulkeva tilavuusvirta oli tässä mittauksessa  $1\ \text{l/min}$ , koronavirta  $1\ \mu\text{A}$  ja trap-jännite  $19,7\ \text{V}$ . Trap-jännite ja tilavuusvirta valittiin siis noin kaksinkertaiseksi normaaliasetuksiin verrattuna.

Näissäkin mittauksissa tarkoituksena oli pitää aerosolin hiukkaspitoisuus vakiona, mutta valitettavasti tämä ei onnistunut. Hiukkaspitoisuus vaihteli eri mittauksissa välillä  $4500 - 15000\ 1/\text{cm}^3$ . Oletimme kuitenkin, että mittaustuloksen kannalta tällä ei ollut merkitystä. Hiukkaskokoa muutimme mittauksissa tarkoituksella ja mitatut hiukkaskoot olivat väliltä 11 – 500 nm. Mittaamisessa käytimme hyödyksi kahta eri DMA:ta, jotka olivat TSI Nano ja Vienna Long. Mitattavien aerosolihiukkasten varaus oli tässä mittauksessa  $-1e$ .

### **3.1.3 Mittausdatan käsittely**

Kuvassa 6 on esitetty neljän mittaussyklin data eFilterillä, CPC:llä sekä Faradayn kupin ja elektrometrin yhdistelmällä mitattuna. eFilterin ja Faradayn kupin kohdalla pystyaksellilla on esitetty sen mittaamaa virta, joka on riippuvainen hiukkasten lukumäärästä sekä koosta. CPC:n kohdalla pystyakseli kuvaa suoraan laitteen läpi kulkevien hiukkasten lukumäärää.



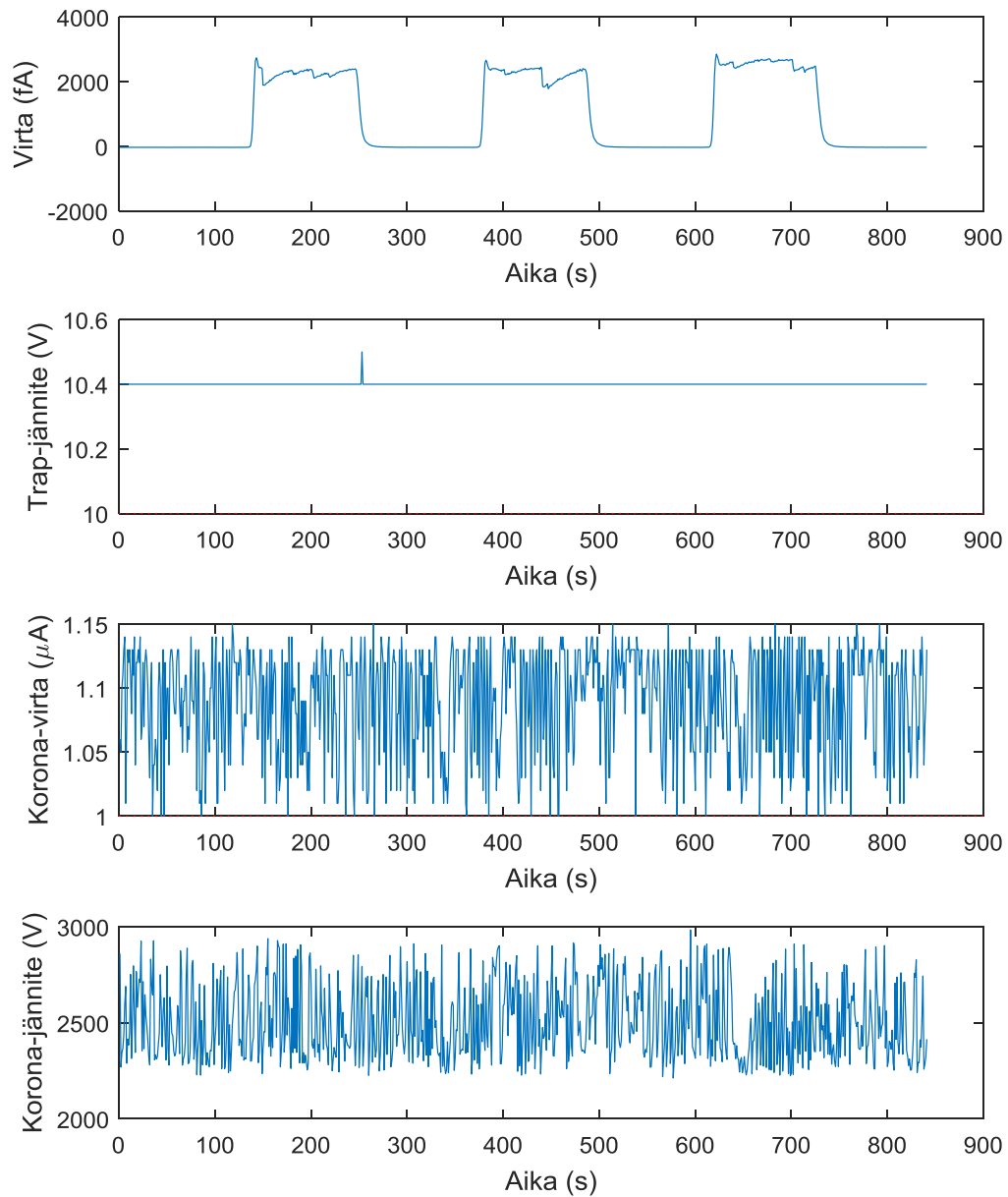
**Kuva 6.** Neljän mittaussyklin data eFilterillä, CPC:llä sekä Faradayn kupin ja elektrometrin yhdistelmällä mitattuna. Punaisilla mustilla pystyviivoilla on esitetty tulosten laskennassa hyödynnetyt 70 sekunnin mittaiset aikavälit.

Kuvasta 6 voidaan havaita, että DMA:n jännitteen noston ja laskun vaikutukset eivät tapahdu aivan välittömästi, vaan lyhyellä viiveellä. Kuvasta nähdään myös, että CPC:n mukaan hiukkaspitoisuus rampin aikana pysyy likimain vakiona lukuun ottamatta alussa syntyvää pientä piikkiä. Jännitteen nostovaiheessa havaittu piikki johtuu siitä, että SCAR:lta tulevien hiukkasten kokojakauman maksimi ei vastaa täsmälleen DMA:han ohjelmoitua jännitettä. Tässä tapauksessa kokojakauman maksimi on hieman pienemmän hiukkaskoon alueella kuin mitä valitsemamme DMA:n asetusarvo vastaa. Piikki syntyy siis, kun DMA:n jännite kulkee tuota hiukkaskokojakauman maksimia vastaavan jännitteen kautta valitsemamme asetusarvoon. Kyseinen piikki on heikosti nähtävillä myös eFilterin mittauksessa.

Kuvaan 6 on merkitty punaisilla pystyviivoilla kolme 70 sekunnin mittaista aikaväliä. Vastaavien aikavälien dataa hyödynnetään varsinaisen Pn-käyrän laskennassa. Huomattavaa on, että aikavälien aloitus- ja lopetusajankohdat on valittu siten että käyrän muoto on ehtinyt tasoittua mahdollisimman hyvin. Kunkin aikavälin keskiarvo tallennettiin kuvaamaan yksittäisen rampin ajalta havaittua virtaa tai hiukkaspitoisuutta. Mustilla pystyviivoilla on merkitty kuvaan neljä 70 sekunnin mittaista aikaväliä. Näiltäkin aikaväleiltä laskettiin keskiarvot, joiden tarkoituksena on tarkistaa, että näyttääkö mittalaite nollaa, kun hiukkasia ei kulje sen läpi. Jos arvo oli nolasta poikkeava, niin ramppien ajalta mitattuja keskiarvoja korjattiin rampin viereisistä nollamittauksista havaitun poikkeaman arvolla. Yksittäisestä mittauksesta saatiin siis kolme erillistä keskiarvoa, joiden avulla voitiin laskea kolme erillistä Pn-arvoa kaavalla (2). Lopullinen Pn-arvo esitetään tuloksissa näiden kolmen keskiarvona. Virherajoina lopulliselle Pn-arvolle käytimme kolmen alustavan Pn-arvon joukolle laskettua keskihajontaa.

Kyseisissä eFilterin mittauksissa huomattavaa on kuitenkin se, että mitatun virran arvo näyttää vaihtelevan huomattavasti joidenkin ramppien aikana. Virtakäyrän muoto näyttäisi siltä, että virran arvo tippuu äkillisesti ja nousee hiljalleen takaisin vakioarvoon. Sama notkahtelu toistuu syklin aikana useita kertoja ja on havaittavissa useissa muissakin rampeissa koko mittausten ajalta. Mittausdatan perusteella vaikutti silmämääräisesti siltä, että notkahdukset olivat sitä merkittävämpiä, mitä suurempia hiukkasia mittausta koski. Notkahdukset eivät voi johtua hiukkapitoisuuden vaihtelusta, koska muiden mittalaitteiden käyrät ovat jokaisessa mittauksessa tasaisia. Notkahdusten syytä on siis etsittävä muualta. Kuvassa 7 on esitetty eFilterin virta, trap jännite, koronavirta ja koronajännite samassa kuvassa erään mittauksen aikana, jolloin notkahduksia havaittiin. Kuvasta voidaan tutkia, että voisiko jokin edellä mainituista suureista auttaa notkahdusten selittämisessä.





**Kuva 7.** *eFilterin virta, trap-jännite, koronavirta ja koronajännite samalla aikaskaalalla esitettynä.*

Kuvasta 7 havaitaan, että trap-jännitteen, koronavirran tai koronajännitteen arvoissa ei ole havaittavissa selkeitä merkittäviä häiriöitä eFilterin mittaamien virran arvon notkahdusten aikana. Tämä viittaa siihen, että koronavaraajan tai trapin likaantuminen ei ole yhteydessä virran arvon notkahduksiin. Virran notkahdusten syy jää tämän vuoksi tällä erää arvoitukseksi.

## 3.2 Hiukkaspäästöjen sähköisen varauksen neutraloitumisen tutkiminen ohiajomittauksella

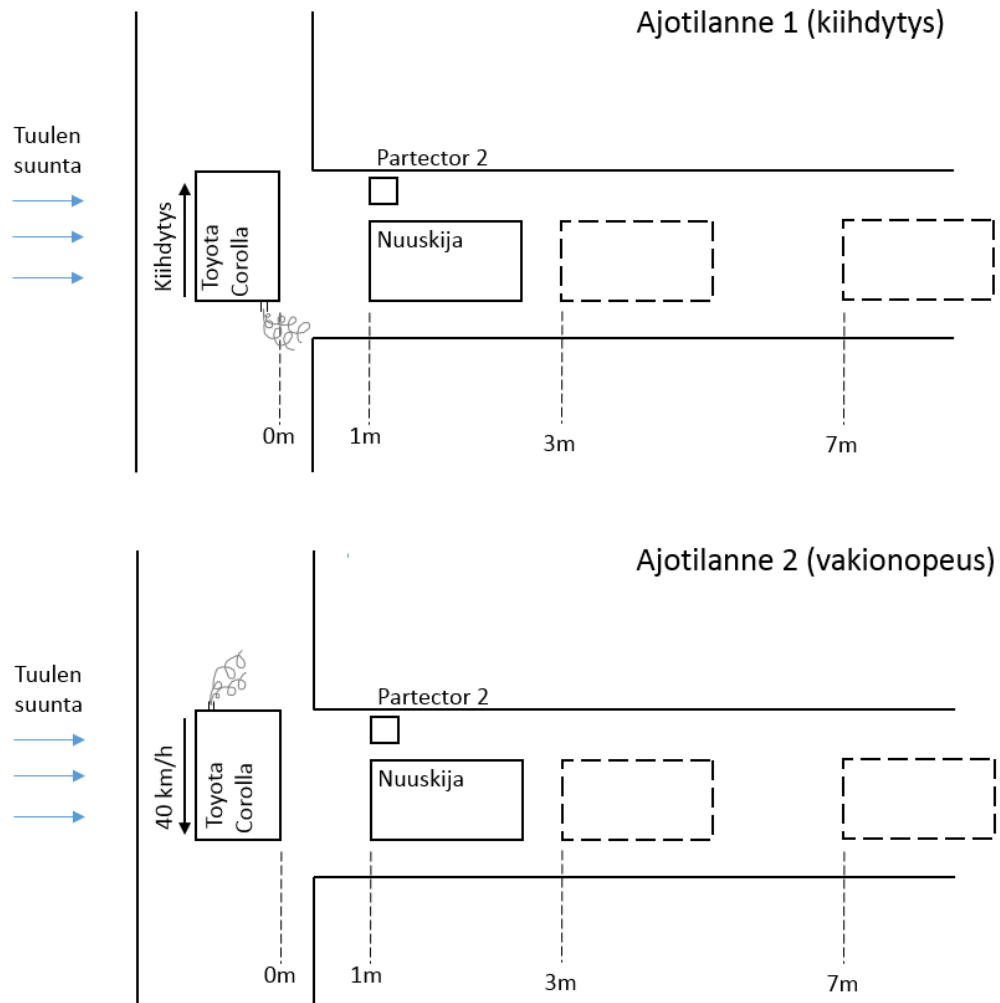
Tässä mittauksessa ensisijaisena tavoitteena oli tutkia dieselmoottorin päästöjen varattujen aerosolihiukkasten neutraloitumista etäisyyden ja ajan funktiona sekä tutkia eFilterin toimintaa päästömittauksissa. Mittaukset suoritettiin Alastaron moottoriradan läheisyydessä. Oletuksena mittauksessa oli se, että dieselautojen hiukkaspäästöt sisältävät keskimäärin enemmän sähköisesti varautuneita hiukkasia kuin taustailma. Tästä johtuen on myös odotettavissa, että päästöissä oleva varattujen hiukkasten osuus pienenee ilmaan saapuessaan pikkuhiljaa taustan osuuden tasolle kappaleessa 2.1 esitettyjen prosessien kautta.

Toisena tavoitteena oli selvittää, kuinka hyvin aerosolihiukkasten neutraloitumista voidaan mitata eFilterin avulla. Tämän selvittämistä varten olisi ollut suotavaa selvittää tarkkaan mitä eFilterin notkahdukset johtuvat tai vaihtaa laite uuteen ja paremmin toimivaan yksilöön. Aikataulukkiireistä johtuen tätä ei kuitenkaan kyetty tekemään, joten mittauksia jatkettiin samalla eFilter-laitteella kuin karakterisointimittauksissakin.

### 3.2.1 Mittausasetelma

Päästölähteenä mittauksessa käytettiin Euro IV-dieselmoottorilla varustettua Toyota Corolla-autoa, jossa ei ollut hiukkassuodatinta. Polttoaineena autossa käytettiin Neste MY-dieseliä. Mittauksissa tutkittiin kahta ajotilannetta: Pysähdyksistä lähtevää kiihdytystä 1. vaihteella sekä ajoa 40 km/h vakionopeudella 3. vaihteella. Kiihdytysajoa kutsutaan jatkossa ajotilanteeksi 1 ja vakionopeudella tehtyä ajoa ajotilanteeksi 2.

Ohiajomittauksissa hyödynnettiin päästömittauksiin erikoistunutta Metropolian ammattikorkeakoulun Nuuskija-autoa. Autossa näyte otetaan auton puskurissa 60 cm korkeudella olevasta näytteenottolinjasta, jonka kautta näyte johdetaan autossa sijaitseville mittalaitteille. Kuvassa 8 on esitetty kaaviokuva ohiajomittausten mittausjärjestelystä.



**Kuva 8.** Kaaviokuva ohiajomittausten suorittamisesta, joissa mittauksia suoritettiin kolmella eri etäisyydellä ohiajolinjasta.

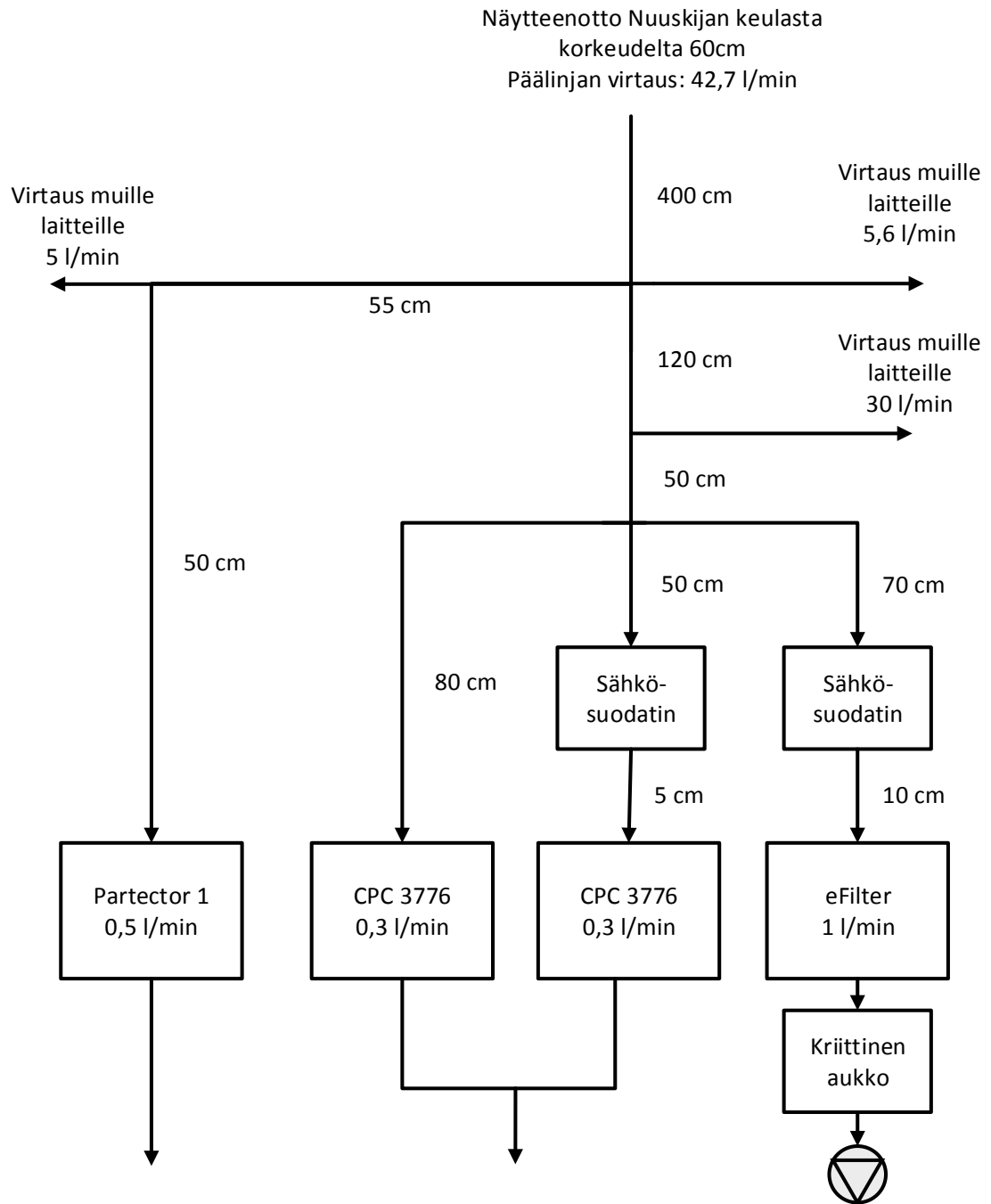
Kuvasta 8 nähdään, että mittauksessa hyödynnettiin T-risteystä, jossa Nuuskija asetettiin suoralta tieltä risteävälle tielle mittaamaan ja Toyota Corolla ajoi suoraa tietä Nuuskijan ohi. Mittauksia tehtiin kolmella eri etäisyydellä niin, että kullakin etäisyydellä sekä ajotilanne 1 että 2 toistettiin kymmenen kertaa. Ajotilanteet 1 ja 2 ajettiin eri suuntiin, jolloin ajotilanteessa 1 Toyotan pakoputki oli noin metrin lähempänä Nuuskijaa kuin ajotilanteessa 2. Toyotan ja Nuuskijan keulan väliset etäisyydet mittauksissa olivat 1, 3 ja 7 m.

Kuvasta nähdään myös, että mittauksissa hyödynnetty risteys valittiin niin, että tuulen suunta oli sen tien suuntainen, jolle nuuskija asetettiin mittaamaan. Tuulen suunta mitattiin Nuuskijan katolla olevan tuulimittarin avulla. Tämä tehtiin siksi, että Toyota Corollan tuottamat päästöt kulkeutuisivat mahdollisimman hyvin Nuuskijan luo. Nuuskijan sisällä olevien laitteiden lisäksi mittauksissa hyödynnettiin yhtä Partectoria, joka asetettiin vakioetäisyydelle 1m ohiajolinjasta ja Nuuskijan näytteenottolinjaa vastaavalle 60 cm korkeudelle. Tämän mittalaitteen päätarkoituksena on toimia referenssipisteenä, jonka avulla voidaan selvittää kuinka kauan päästöjen kulkeutuminen 3 ja 7 metrin etäisyyksille kestää. Tätä tarkoitusta varten Nuuskijan sisällä on myös toinen samanlainen Partector-laite,

joka on synkronoitu täsmälleen samaan aikaan ulkona olevan Partectorin kanssa. Ulkona olevaa Partectoria kutsutaan tässä työssä nimellä Partector 2 ja Nuuskijassa sisällä olevaa laitetta nimellä Partector 1.

### **3.2.2 Mittauslaitteisto**

Mittauksissa näyte johdettiin Nuuskijan keulasta näytteenottolinjaa pitkin auton takaosaan, jonne mittalaitteet oli sijoitettu. Näytteenoton päälinja oli valmistettu ruostumattomasta teräksestä, ja sen pituus oli noin 4 m. Päälinjasta laitteille johtavat linjat tehtiin puolestaan sähköä johtavista Tygon-letkuista. Linjasto pyrittiin pitämään mahdollisimman lyhyenä häviöiden minimoimiseksi. Kuvassa 9 on esitetty kaaviokuva Nuuskijan sisältämästä mittauslaitteistosta.



**Kuva 9.** Kaaviokuva Nuuskija-auton sisältämästä mittauslaitteistosta sekä mitauslinjojen pituuksista ja tilavuusvirroista.

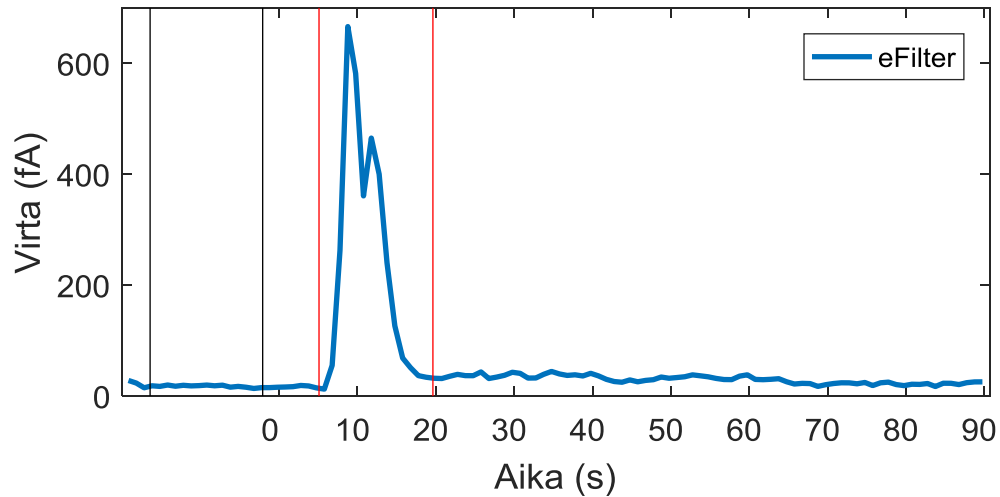
Kuvasta 9 Nähdään, että mittauksissa hyödynnettiin neljää eri mittalaitetta. Kuten jo aiemmin mainittiin, Partector 1:n tarkoituksena on olla vertailukohta ulkona sijaitsevalle Partector 2-laitteelle. Molemmat näistä mittaavat päästön keuhkocodepositoivaa pinta-alapitoisuutta eli LDSA:ta. Molempien Partectorien läpi kulkeva tilavuusvirta oli mittauksissa Partectorien sisäisen pumpun määrittämä 0,5 l/min.

Käytetyt CPC:t olivat TSI:n valmistamia ja niitä oli Nuuskijassa kaksi kappaletta. Laitteet olivat keskenään samaa 3776-mallia, jotta niiden tulokset olisivat mahdollisimman hyvin vertailukelpoisia. Samasta syystä molempien läpi asetettiin myös kulkemaan sama 0,3 l/min tilavuusvirtaus. Molemmissa laitteissa virtauksen säätö tapahtui CPC:n omalla sisäisellä pumpulla. Toisen CPC:n edessä oli mittauksissa jatkuvasti päällä oleva sähkösuodatin ja toisen edessä ei. Päällä olevan sähkösuodattimen jännite oli 4 kV. Sähkösuodattimen tarkoituksena on poistaa näytteestä kaikki varatut hiukkaset ennen näytteen kulkeutumista CPC:lle. Sähkösuodattimen jälkeisen CPC:n tarkoituksena on siis mitata näytteen neutraalien hiukkasten lukumääräpitoisuus. Toinen CPC puolestaan mittaa näytteen kaikkien aerosolihiukkasten lukumääräpitoisuuden. Näiden tietojen avulla voidaan myöhemmin laskea varattujen hiukkasten osuus näytteestä kullakin mittausetäisyydellä.

Neljäntenä mittalaitteena toimi eFilter, jonka edessä oli myös sähkösuodatin. eFilterin yhteydessä oleva sähkösuodatin oli päällä viidessä kummankin ajotilanteen mittauksessa kullakin etäisyydellä ja pois päältä loput mittauksista. Toisin sanoen sähkösuodatin oli päällä puolet kummankin ajotilanteen mittauksista. Päällä olevan sähkösuodattimen jännite oli 1 kV. Tällöin myös eFilterin avulla mitatun datan avulla voidaan laskea arvio varattujen hiukkasten osuudesta kullakin mittausetäisyydellä. eFilter toimi mittauksissa testiasetuksilla, jonka vuoksi laitteen läpi meneväksi tilavuusvirraksi säädettiin kriittisen aukon avulla 1 l/min.

### 3.2.3 Mittausdatan käsittely

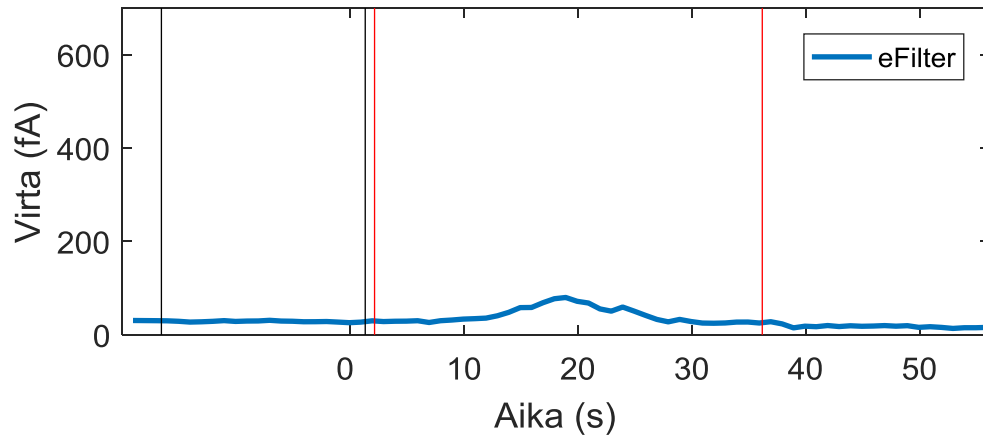
eFilterin ja molempien CPC-laitteiden data käsiteltiin mittauksia varten samalla tavalla. Ensin etsittiin raakadatasta kutakin ohiajoa vastaavan aikavälin data tarkempaan käsitteelyyn. Kuvassa 10 on esitetty yhden mittauksen raakadata eFilterillä mitattuna ajotilanteesta 1.



**Kuva 10.** Ohiajon raakadata eFilterillä mitattuna kiihdytyksessä eli ajotilanteessa 1. Taustan hiukkaspitoisuuden kuvaamiseen valittu aikaväli on merkitty mustilla pystyviivoilla ja piikin keston aikaväli on merkitty punaisilla pystyviivoilla.

Kuvasta 10 havaitaan, että ohiajo näkyy datassa mittaussignaalin piikkinä, joka kyseisessä tapauksessa kestää noin 15 sekuntia. Piikin keston aikaväli on merkitty Kuvaan 10 punaisella värillä. Ennen piikkiä mustilla pystyviivoilla merkitty alue on aikaväli, joka on valittu kuvaamaan taustailman hiukkaspitoisuutta. Määritimme vastaavat aikavälit kaikille mittalaitteille ja mittapisteille. Mittauksissa arvioimme yhden piikin pinta-alaa trapetsi-integraalin avulla, joka laskettiin punaisilla pystyviivoilla merkityltä ajanjaksolta. Piikin pinta-ala on verrannollinen hiukkaspitoisuuteen, joten sen avulla voidaan myöhemmin laskea varattujen hiukkasten osuus päästön kokonaishiukkaspitoisuudesta. Jotta pystyisimme kuvaamaan nimenomaan ohi ajavan auton päästöjä, niin trapetsi-integraalin avulla lasketun pinta-alan arvosta on vähennettävä taustailmaa kuvaava pinta-ala. Arvio taustaa kuvaavasta pinta-alasta laskettiin taustamittauksen hiukkaspitoisuuden keskiarvon ja punaisilla pystyviivoilla merkityn ajanjakson tulona. Toisin sanoen ainoastaan auton päästöjä kuvaava pinta-ala on arviomme mukaan piikin pinta-alan ja taustaa vastaavan pinta-alan erotus. Tätä pinta-alaa, josta taustan osuus on poistettu, merkitään jatkossa symbolilla  $A$ .

Kuvassa 11 on esitetty yhden mittauksen raakadata eFilterillä mitattuna ajotilanteesta 2.

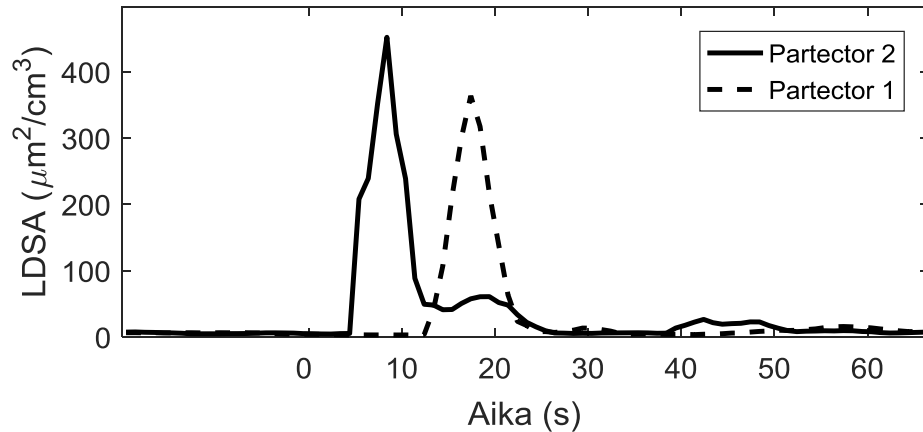


**Kuva 11.** Ohiajon raakadata eFilterillä mitattuna vakionopeudella ajotilanteessa 2. Taustan hiukkaspitoisuuden kuvaamiseen valittu aikaväli on merkitty mustilla pystyviivoilla ja piikin keston aikaväli on merkitty punaisilla pystyviivoilla.

Kuvasta 11 havaitaan, että ajotilanteessa 2 syntyvien hiukkasten lukumääräpitoisuus on selkeästi alhaisempi kuin ajotilanteessa 1. Tämä saattaa vaikeuttaa hieman luotettavien tulosten saamista, sillä laitteiden taustakohinan ja taustailman hiukkaspitoisuuden vaihtelut vaikuttavat näihin tuloksiin suhteellisesti enemmän kuin ajotilanteessa 1. Kuvasta havaitaan myös, että piikin vasemmalla puolella havaittava taustapitoisuus on eFilterin mukaan hieman korkeammalla kuin oikealla puolella. Tämä voi johtua joko taustapitoisuuden muutoksesta tai jonkinlaisesta häiriöstä mittauksessa, esimerkiksi tärinän aiheuttamana. Tällaista taustasignaalin vaihtelua oli havaittavissa muillakin laitteilla hieman, mutta eFilterillä vaihtelu oli selkeästi suurempaa ja välillä myös muista laitteista poikkeavaa. Erityisesti ajotilanteen 2 mittauksia tulee tarkastella tässä tutkimuksessa kriittisesti siksi, että taustapitoisuuden todelliset vaihtelut sekä eFilterin signaalin vaihtelu vaikuttavat näihin tuloksiin huomattavasti enemmän kuin ajotilanteen 1 mittauksiin.

Mittauksissa halusimme myös selvittää varautuneiden hiukkasten neutraloitumisen aikaskaalan. Tätä varten mittauksissa oli mukana kaksi Partectoria, joiden kellot oli synkronoitu. Kuvassa 12 on esitetty erään kahden Partectorin data yhdestä mittauksesta ajotilanteessa 1, kun Nuuskijan keula on 7 m etäisyydellä ohiajolinjasta ja Partector 2 on yhden metrin etäisyydellä ajolinjasta. Tilanteessa Partector 1 on Nuuskijan sisällä.

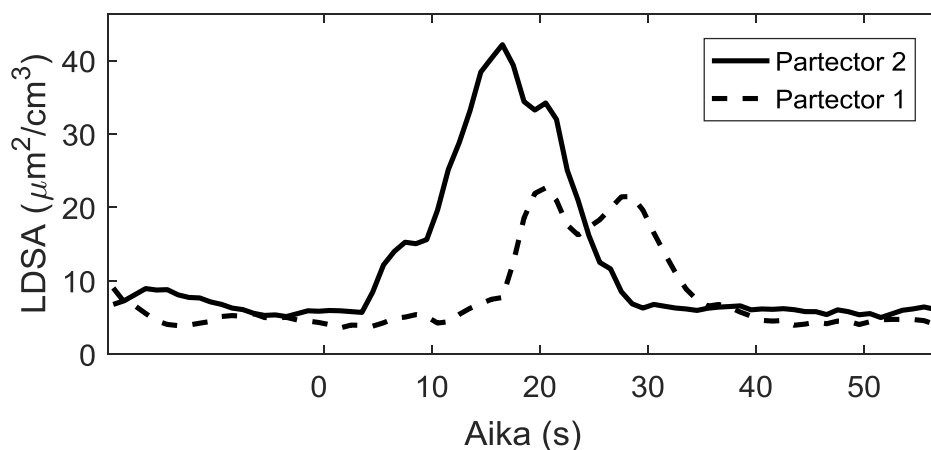




**Kuva 12.** Kahden Partectorin avulla mitatut päästön aiheuttamat piikit ohiajomitauksesta ajotilanteesta 1. Partector 2 on 1 metrin etäisyydellä ja Partector 1 on 7 metrin etäisyydellä ohiajolinjasta.

Kuvasta 12 havaitaan, että molempien Partectorien mittauksista on havaittavissa selkeä piikki. Näissä mittauksissa päästön kulkeutumiseen kulunut aika määritettiin yksinkertaisesti piikkien huippujen välisestä aikaerosta. Aikaeroa tulkitessa on kuitenkin huomattava, että kun hiukkaspäästö saapuu kyseisessä mittauksessa Nuuskijan keulan kohdalle, niin näyte viipyy vielä jonkin aikaa Nuuskijan mittauslinjassa ennen saapumista Partector 1:lle. Nuuskijan mittauslinjan viipymäaika mittauksissa oli noin 3,3 sekuntia.

Päästön kulkeutumiseen kuluneen ajan määrittäminen ei kuitenkaan aina ollut mittauksissa täysin yksiselitteistä. Tuuliolosuhteista ja turbulentista diffuusiosta johtuen, piikkien muoto saattoi olla hyvinkin epämääräinen ja muuttua etäisyyden kasvaessa. Kuvassa 13 on esitetty esimerkki tällaisesta tilanteesta.



**Kuva 13.** Kahden Partectorin avulla mitatut päästön aiheuttamat piikit ohiajomitauksesta ajotilanteesta 2. Partector 2 on 1 metrin etäisyydellä ja Partector 1 on 3 metrin etäisyydellä ohiajolinjasta.

Kuvasta 13 nähdään, että Partector 2:n datassa hiukkaspäästö näkyy piikkinä, jolla on yksi selkeä huippu, kun taas Partector 1:n datassa kaksi lähes yhtä korkeaa huippua. Mittauksissa piikin huipuksi määriteltiin aina datan suurimman huipun arvoa vastaava aika. Tässä tapauksessa korkein on kohdalla 20 s oleva huippu. Toisaalta mittauksessa olisi voinut käydä myös niin, että kohdalla 30 s oleva huippu olisi hieman erilaisissa tuuliolosuhteissa muodostunut korkeammaksi. Mittauksissa kaksi- tai useampihiippuisia aikasarjoja oli yhteensä viisi kappaletta. Näistä kahdessa aikaeron määrittelyn epävarmuus oli 10 – 15 s ja kolmessa 5 – 10 s. Tämä tarkoittaa siis sitä, että osassa mittauksista aikaeron määrittelyssä voi olla jopa 15 sekunnin epävarmuus. Suurinta osaa aikaeron mittauksista voidaan kuitenkin pitää yksiselitteisinä ja luotettavina.

### 3.2.4 Tulosten laskenta

Tässä kappaleessa hyödynnetään kaikissa laskutoimituksissa mittauspiikkien integroitua pinta-alaa  $A$ , josta taustan osuus on poistettu. Kyseisen tiedon avulla varautuneiden hiukkasten osuus päästöistä voitiin määrittää yksittäisille pisteille kahden CPC:n datasta saatujen piikkien pinta-alojen. Sähkösuodatimen kanssa toimivan CPC:n datasta saatiin päästön sisältämien neutraalien hiukkasten pitoisuuteen verrannollinen pinta-ala  $A_{neutraalit}$  kullekin mittaukselle. Ilman sähkösuodatinta toimivan CPC:n datasta saatiin puolestaan päästön sisältämien hiukkasten kokonaispitoisuuteen verrannollinen pinta-ala eli  $A_{kok}$ . Tällöin päästönäytteen varattujen hiukkasten osuus kaikista päästön hiukkasista eli  $F_{varatut}$  saadaan seuraavasta yhtälöstä:

$$F_{varatut} = \frac{A_{kok} - A_{neutraalit}}{A_{kok}} \quad (4)$$

Virherajoina yksittäisille etäisyyksille laskettujen CPC-laitteiden tuloksissa käytettiin laskettujen varattujen hiukkasten osuuksien keskihajontaa.

eFilteriltä saaduille tuloksille laskentatapa oli hieman erilainen. Varattujen hiukkasten osuutta ei voida määrittää yksittäisten mittausten perusteella, koska sähkösuodatinta jouduttiin pitämään yksittäisessä mittauksessa joko päällä tai pois päältä. Tästä syystä varattujen hiukkasten osuus jouduttiin laskemaan yksittäiselle etäisyydelle kerrallaan, piikkien pinta-alojen normeerattujen keskiarvojen avulla. Ennen varsinaisen tuloksen laskemista eFilterin piikkien pinta-alat  $A_{efilter}$  normeerattiin niitä vastaavista mittauksista saatujen Partector 1:n piikkien pinta-alojen  $A_{partector\ 1}$  arvolla seuraavasti:

$$A_{norm} = \frac{A_{efilter}}{A_{partector\ 1}} \quad (4)$$

Tällä laskutoimituksella varmistettiin se, että eri mittauskerroilla saadut tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään. Seuraavaksi laskettiin kullekin etäisyydelle normeerattujen piikkien pinta-alojen keskiarvot erikseen mittauksille, joissa sähkösuodatin oli päällä ja

joissa sähkösuodatin ei ollut päällä. Tämän jälkeen varattujen hiukkasten osuus  $F_{varatut}$  voitiin laskea kyseisistä keskiarvoista seuraavasti:

$$F_{varatut} = \frac{\bar{A}_{norm,pois} - \bar{A}_{norm,päällä}}{\bar{A}_{norm,pois}} \quad (4)$$

jossa  $\bar{A}_{norm,pois}$  on normeerattu piikkien pinta-alojen keskiarvo mittauksille, joissa sähkösuodatin ei ollut päällä ja  $\bar{A}_{norm,päällä}$  on normeerattu piikkien pinta-alojen keskiarvo mittauksille, joissa sähkösuodatin oli päällä.

eFilterin kohdalla ylävirherajan  $F_{varatut,max}$  ja alavirherajan  $F_{varatut,min}$  määrittäminen yksittäiselle etäisyydelle tehtiin normeerattujen integrointipiikkien keskiarvojen ja keskihajontojen avulla seuraavasti:

$$F_{varatut,max} = \frac{(\bar{A}_{norm,pois} + \sigma_{norm,pois}) - (\bar{A}_{norm,päällä} - \sigma_{norm,päällä})}{(\bar{A}_{norm,pois} + \sigma_{norm,pois})} \quad (5)$$

$$F_{varatut,min} = \frac{(\bar{A}_{norm,pois} - \sigma_{norm,pois}) - (\bar{A}_{norm,päällä} + \sigma_{norm,päällä})}{(\bar{A}_{norm,pois} - \sigma_{norm,pois})} \quad (6)$$

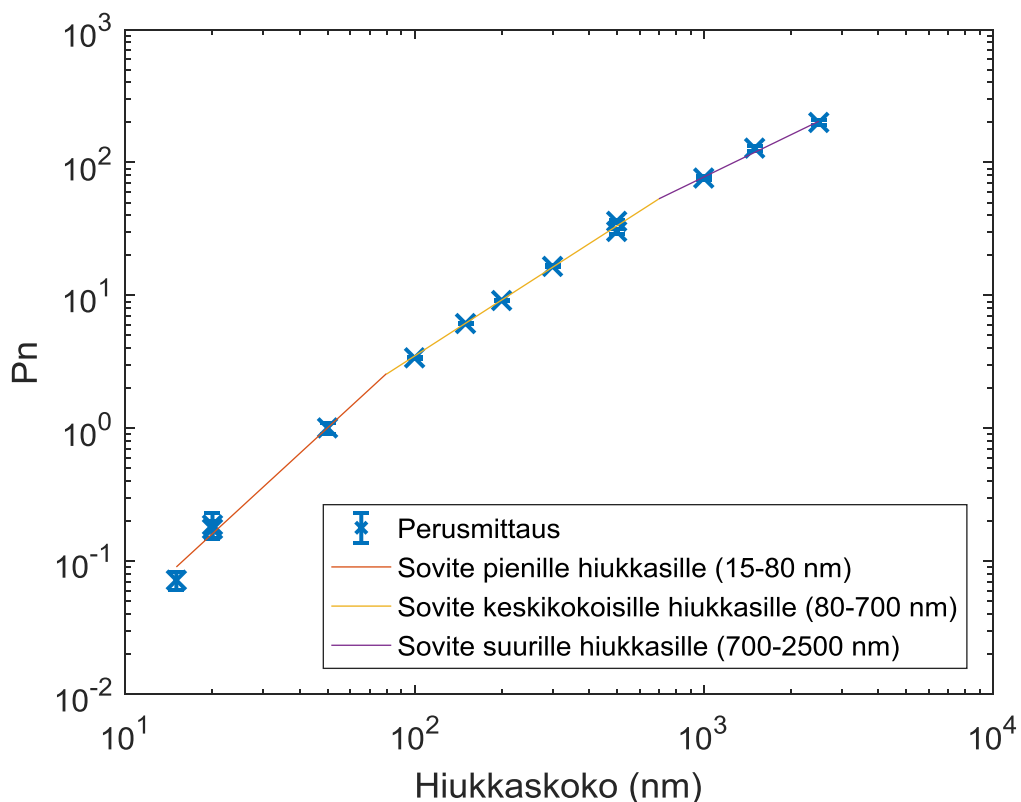
joissa  $\sigma_{norm,pois}$  on normeerattujen integrointipiikkien keskihajonta mittauksille, joissa sähkösuodatin ei ollut päällä ja  $\sigma_{norm,päällä}$  on normeerattujen integrointipiikkien keskihajonta mittauksille, joissa sähkösuodatin oli päällä.

## 4. EFILTERIN KARAKTERISOINTIMITTAUKSEN TULOKSET JA NIIDEN ANALYYSINTI

Seuraavissa neljässä kappaleessa esitellään ja analysoidaan eFilterin karakterisointimitauksista saadut tulokset. Kappaleessa 4.1 käsitellään perusmittauksen tuloksia. Kappaleessa 4.2 käsitellään hiukkaspitoisuuden vaikutusta eFilterin toimintaan. Kappaleessa 4.3 kerrotaan miten eFilter toimi neutraaleja hiukkasia mitatessa ja kappaleessa 4.4 käsitellään sen toimintaa testiasetuksilla.

### 4.1 Perusmittaukset

Kuvassa 14 on esitetty perusmittauksista saadut  $P_n$ -arvot hiukkaskoon funktiona. Kuvaan on merkitty punaisella, keltaisella ja violetilla värillä sovitteet kolmelle eri hiukkaskokovalille, jotka yhdessä kuvaavat laitteen toimintaa koko mitatulla hiukkaskokoalueella.



**Kuva 14.** Perusmittauksen tulokset ja sovitteet eri kokoisille hiukkasille.  $P_n$ -arvot on laskettu Faradayn kupin mittaamien hiukkaspitoisuuksien perusteella. Virherajoina on käytetty yksittäiselle hiukkaskoolle laskettujen kolmen  $P_n$ -arvon keskihajontaa.

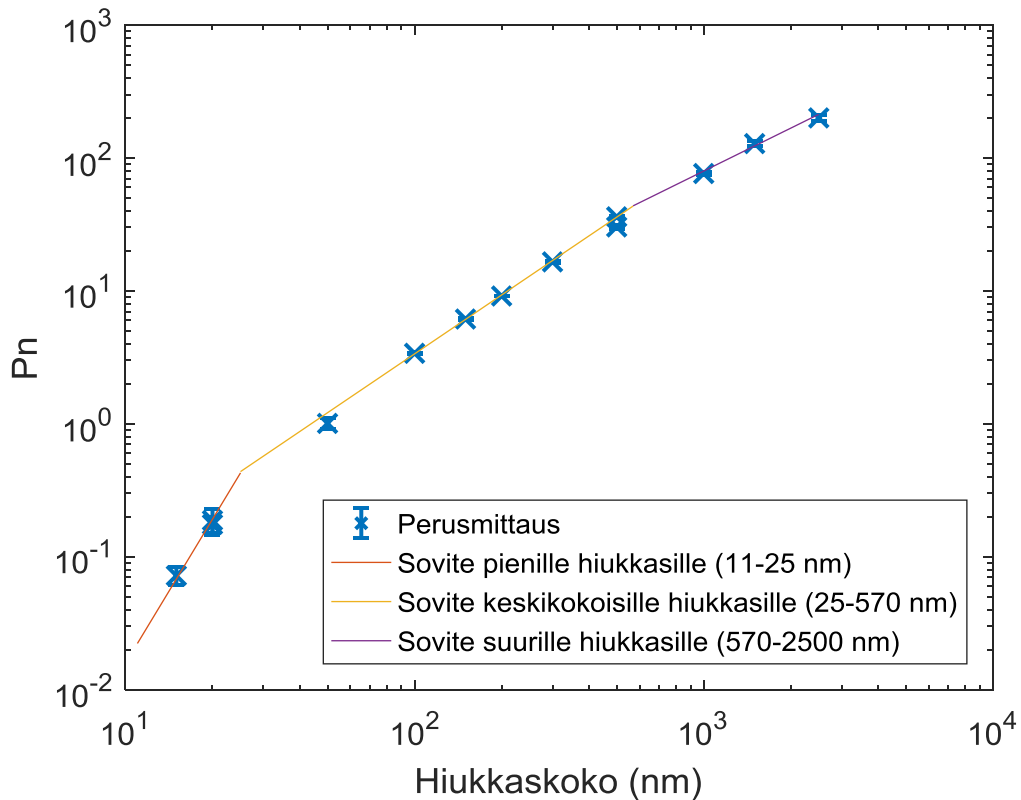
Kuvasta 14 nähdään, että sovitteen jyrkkyys riippuu hiukkaskoosta. Pienten hiukkaskokojen sovite on huomattavasti jyrkempi kuin suurten hiukkaskokojen sovite. Pienimpien hiukkaskokojen alueella muotoon vaikuttaa luultavasti diffuusiohäviöt laitteessa sekä varautumistodennäköisyys. Mitä pienempiä hiukkaset ovat, sitä pienempi niiden varautumistodennäköisyys on ja sitä enemmän diffuusiohäviöt vaikuttavat. Tämä aiheuttaa sen, että pienempiä hiukkaskokoja kohti mentäessä käyrä muuttuu jyrkemmäksi. Suurimpien hiukkaskokojen alueella puolestaan impaktiohäviöt ovat luultavasti selittävä tekijä mittapistejoukon lisääntyvälle kaareutumiselle. Mitä suurempia hiukkaset ovat, sitä suuremman liikemäärän ne saavat virtauksessa ja törmäävät helpommin laitteen sisäisessä linjastossa seinämiin ja mutkiin.

Kuvassa 14 esitetyt sovitteet ovat seuraavat ( $d_p$  esitetty nanometreissä):

$$Pn = \begin{cases} 0.0004024 \times d_p^{2.001}, & 15 \text{ nm} \leq d_p < 80 \text{ nm} \\ 0.005576 \times d_p^{1.399}, & 80 \text{ nm} \leq d_p \leq 700 \text{ nm} \\ 0.05311 \times d_p^{1.055}, & 700 \text{ nm} < d_p \leq 2500 \text{ nm} \end{cases}$$

Kun tarkastellaan sovitteiden potenssitermiä, niin havaitaan sen olevan lähellä arvoa 2 pienillä hiukkasilla ja lähellä arvoa 1 suurilla hiukkasilla. Tästä voidaan päätellä, että eFilterillä mitattu virta on pienten hiukkasten tapauksessa yhteydessä hiukkasten pinta-alaan, kun taas suurten hiukkasten tapauksessa hiukkasten lukumäärään.

Näitä sovitteita tulkitessa herää kuitenkin kysymys siitä, että ovatko ne käyttökelpoisia. Kuvassa 6 nähtävässä eFilterin mittaustuloksissa oli havaittavissa äkillisiä notkahduksia, jotka ovat voineet vaikuttaa mittaustuloksiin. Näiden notkahdusten vaikutus tuloksiin voidaan minimoida yksittäistä mittausaikaväliä kuvaavaksi tunnusluvuksi keskiarvon sijaan 90 % fraktiili. Kuvassa 15 on esitetty sovitteet ja mittauspisteet uudelleen muotoiltuna.

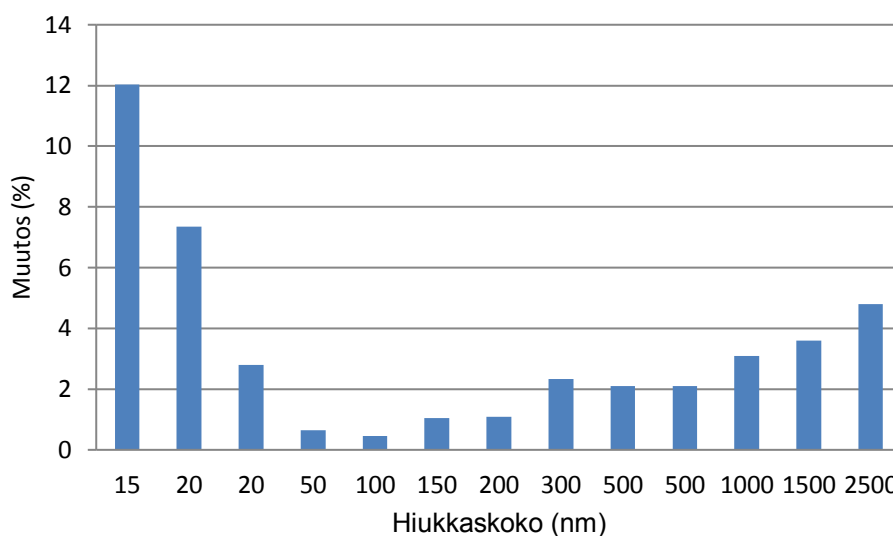


**Kuva 15.** Perusmittauksen tulokset ja sovitteet 90 % fraktiilien avulla laskettuna.  $P_n$ -arvot on laskettu Faradayn kupilla mitattujen hiukkaspitoisuuksien keskiarvojen perusteella. Virherajoina on käytetty yksittäiselle hiukkaskoolle laskettujen kolmen  $P_n$ -arvon keskihajontaa.

Kuvasta 15 nähdään, että mittapisteiden sijainti ei silmämääräisesti muutu Kuvaan 14 verrattuna. Merkittävin muutos on se, että tässä tapauksessa 11 nm hiukkaselle laskettu  $P_n$ -arvo saadaan tällä laskentamenetelmällä positiiviseksi, kun taas keskiarvoilla laskettuna se jäi negatiiviseksi ja jätettiin kuvaajasta pois. Tämän vuoksi myös sovitteet muoiloitiin uudestaan tälle mittaustavalle:

$$P_n = \begin{cases} 3.996 \times 10^{-6} \times d_p^{3.598}, & 11 \text{ nm} \leq d_p < 25 \text{ nm} \\ 0.003843 \times d_p^{1.471}, & 25 \text{ nm} \leq d_p \leq 570 \text{ nm} \\ 0.04849 \times d_p^{1.072}, & 570 \text{ nm} < d_p \leq 2500 \text{ nm} \end{cases}$$

Sovitteista havaitaan, että keskikokoisille ja suurille tehdyt sovitteet pysyivät lähes samanlaisina lukuun ottamatta niiden leikkauspistettä. Pienten hiukkasten sovitteeseen tuli suurempi muutos. Tutkitaan seuraavaksi Kuvien 14 ja 15 välisten mittauspisteiden arvojen eroa vielä hieman tarkemmin. Kuvassa 16 on esitetty eri hiukkaskokoja vastaavien  $P_n$ -arvojen prosentuaalinen muutos keskiarvojen ja 90 % fraktiilien avulla laskettujen mittapisteiden välillä.



**Kuva 16.** *Pn-arvojen prosentuaalinen muutos keskiarvojen ja 90 % fraktiilien avulla laskettujen mittapisteiden välillä.*

Kuvasta 16 nähdään, että prosentuaalisesti eniten fraktiileilla laskeminen vaikutti kaikista pienimpiin hiukkasiin. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että pienten hiukkaskokojen mittauksessa eFilterin tasaisen mittauskohinan merkitys on myös suurin. Tämä johtaa siihen, että pienten hiukkaskokojen mittauspisteiden muutosprosentin arvot ovat systemaattisesti huomattavasti suurempia 90 % fraktiilin avulla lasketuissa tuloksissa. Suurempien hiukkaskokojen alueella kohinan merkitys ei enää ole merkittävä. Kuvasta huomataan myös, että laskentatavan muutos näyttää vaikuttavan sitä enemmän, mitä suurempia hiukkasia tarkastellaan. Tämä viittaa siihen, että tapahtuneiden notkahdusten vaikutus mitaustuloksiin on merkittävämpi suuremmilla hiukkasilla.

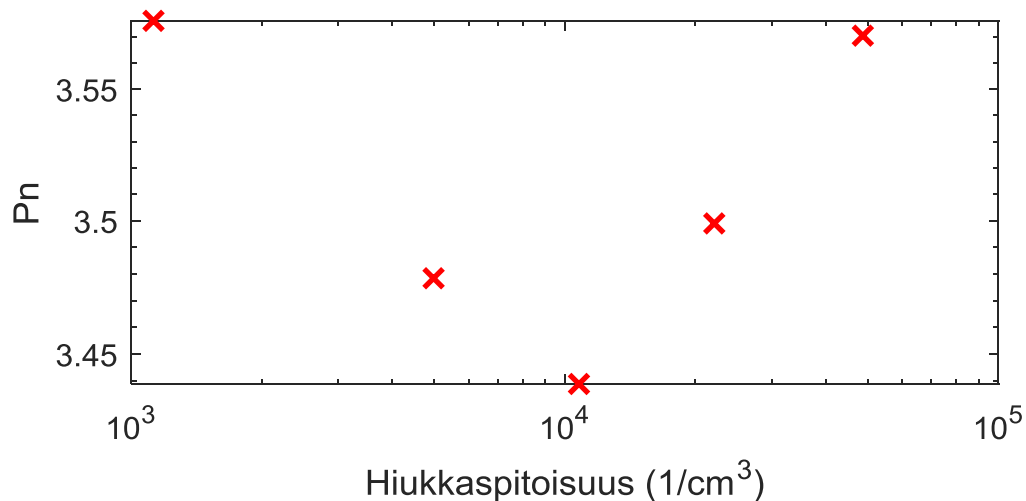
Näiden tulosten ja Kuvien 14 ja 15 tarkastelusta herää kysymys: Kummat lasketuista sovitteista ovat parempia tai käyttökelpoisempia? Tämä riippuu siitä, että onko havaittua notkahtelua havaittavissa muissakin vastaavissa laitteissa, vai ainoastaan kyseisessä yksilössä. Kyseistä mittalaitetta käytettäessä on oletettavaa, että notkahteleva käyttäytyminen tulee jatkumaan ja vaikuttamaan myös tuleviin tuloksiin. Tällöin keskiarvon avulla lasketut tulokset kertovat todenmukaisemmin laitteen toiminnasta. Jos sama notkahtelu on ominaista myös muille samanlaisille laiteyksilöille, niin suosituksena on käyttää keskiarvon avulla muodostettuja sovitteita. Jos kuitenkin notkahtelu on ominaista ainoastaan kyseiselle laitteelle, niin suosituksena on käyttää 90 % fraktiilin avulla muodostettua sovitetta, koska se minimoi notkahdusten aiheuttamat virheet mittauksissa. Tällöin se kuvaa myös todenmukaisemmin sellaiseen laitteen toimintaa, jossa notkahtelua ei tapahdu.

Näiden tulosten perusteella voidaan sanoa, että eFilterin toiminta vaikuttaisi olevan luotettavinta suunnilleen hiukkaskokovälillä 50 – 500 nm, koska kyseisellä hiukkaskokoalueella mittauksen kohinan ja notkahtelun vaikutukset ovat pienimmillään. Tätä havaintoa

tukee myös se, että kyseisellä hiukkaskokovälillä mittauspisteet osuvat hyvin muodostetulle soviteelle. Tämän perusteella voidaan sanoa, että eFilter soveltuu hyvin päästöjen mittaamiseen ainakin nokimoodin hiukkaskokoalueella. Nukleaatiomoodin hiukkaskokoalueella eFilter tuskin antaa kovin luotettavaa mittaustulosta.

## 4.2 Hiukkaspitoisuuden vaikutus

Kuvassa 17 on esitetty tulokset mittauksista, joissa tutkittiin hiukkaspitoisuuden vaikutusta havaittuun mittalaitteen arvoon. Kuvaan on piirretty Pn-arvot hiukkaspitoisuuden funktiona.



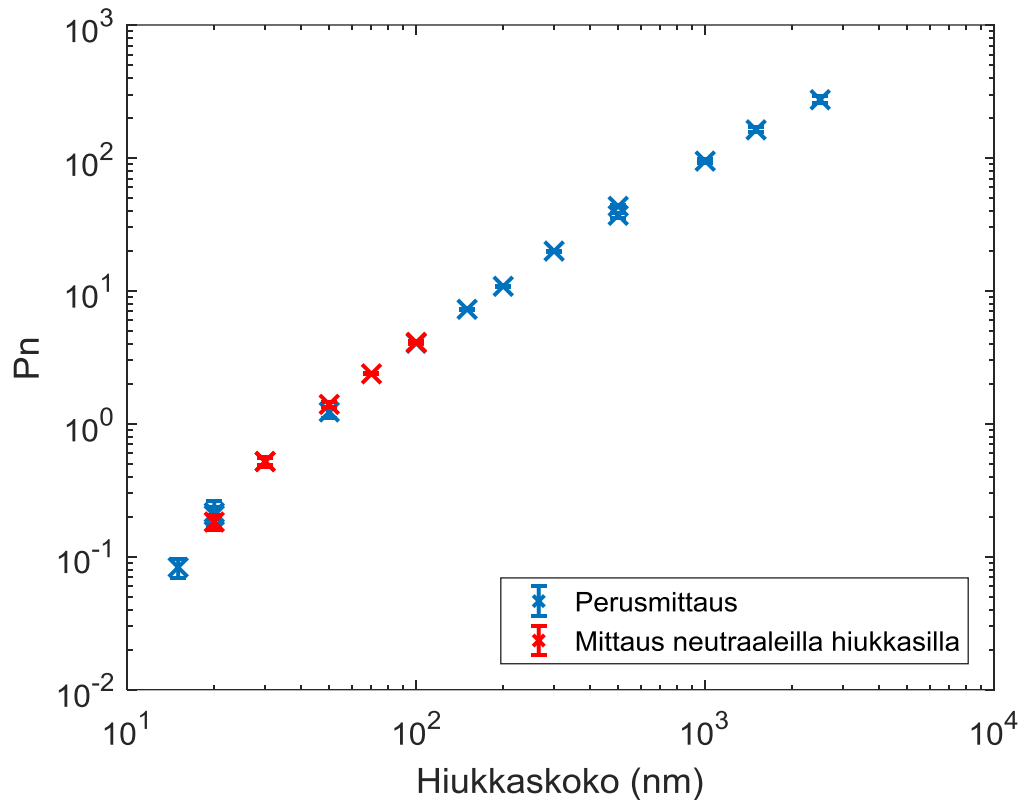
*Kuva 17. Hiukkaspitoisuuden vaikutus halkaisijaltaan 100 nm hiukkasten mittauksessa. Pn-arvot on laskettu Faradayn kupilla mitattujen hiukkaspitoisuuksien perusteella.*

Kuvasta 17 havaitaan, että hiukkaspitoisuuden muutokset eivät aiheuta selkeää muutosta Pn-arvoihin. Mittauspisteiden välillä on havaittavissa jonkin verran hajontaa, mutta tämän voidaan tulkita johtuvan mittausvirheestä. On kuitenkin otettava huomioon, että alue, jolla pitoisuuden vaikutusta mitattiin, on suhteellisen suppea. eFilterin manuaalissa ilmoitetaan, että eFilterillä voidaan maksimissaan mitata jopa 100 000 000 1/cm<sup>3</sup> pitoisuuksia, kun mitattavien hiukkasten koko on 70 nm (Dekati Ltd 2017). Omalla laitteistollamme 50 000 1/cm<sup>3</sup> oli kuitenkin tällä kertaa suurin pitoisuus, jonka kykenimme tuottamaan.

## 4.3 Alkuperäisen varauksen vaikutus

Kuvassa 18 on esitetty tulokset mittauksista, joissa tutkittiin eFilterin toimintaa neutraaleilla hiukkasilla. Kuvaan on piirretty sekä perusmittauksista, että neutraalien hiukkasten mittauksista saadut Pn-arvot hiukkaspitoisuuden funktiona. Perusmittausten mittapisteet on esitetty sinisellä värillä ja neutraalien hiukkasten mittapisteet punaisella värillä.



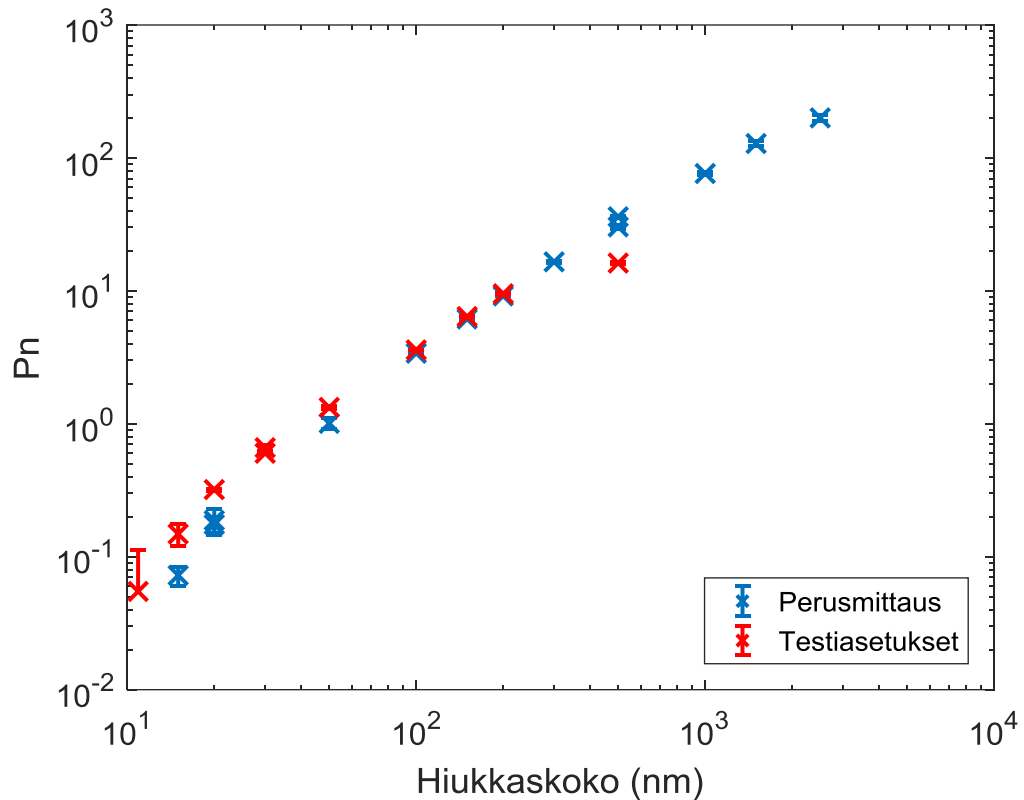


**Kuva 18.** Perusmittausten ja neutraaleilla hiukkasilla suoritettujen mittausten vertailu hiukkaspitoisuudella  $10000 \text{ 1/cm}^3$ .  $P_n$ -arvot on laskettu CPC:llä mitattujen hiukkaspitoisuuksien keskiarvojen perusteella. Virherajoina on käytetty yksittäiselle hiukkaskoolle laskettujen kolmen  $P_n$ -arvon keskihajontaa.

Kuvasta 18 nähdään, että siniset ja punaiset mittapisteteet muodostavat kaaren, jolle voisi hyvinkin muodostaa yhtenäisen sovitteen. Samoja hiukkaskokoja vastaavat mittapisteteet asettuvat kuvassa erittäin lähelle toisiaan. Tästä voidaan päätellä, että eFilter toimii samalla tavalla riippumatta siitä, että onko mitattava hiukkanen kerran varattu vai ei. Toisin sanoen eFilterissä toimiva koronavaraaja luo samanlaisen varauksen sen läpi kulkeville hiukkasille riippumatta niiden alkuperäisestä varauksesta. Tässä mittauksessa täytyy tosin muistaa se, että mittasimme ainoastaan hiukkasia, joiden varaus oli  $-1e$  tai  $0$ . Tavallisesti ilmassa ja pakokaasuissa on myös hiukkasia, joiden varausluku poikkeaa edellä mainituista arvoista. Mittaus ei siis anna kattavaa vastausta siihen, että vaikuttaako hiukkasen alkuperäinen varaus eFilterin antamiin tuloksiin, kun hiukkasten alkuperäinen varausluku on positiivinen tai itseisarvoltaan suurempi kuin yksi.

#### 4.4 Mittaukset testiasetuksilla

Kuvassa 19 on esitetty tulokset mittauksista, joissa tutkittiin eFilterin toimintaa testiasetuksilla. Kuvaa on piirretty sekä perusmittauksista, että testiasetuksilla tehdyistä mittauksista saadut  $P_n$ -arvot hiukkaspitoisuuden funktiona. Perusmittausten mittapisteteet on esitetty sinisellä värillä ja testiasetuksilla mitatut pisteet punaisella värillä.



**Kuva 19.** Testiasetuksilla saadun ja perusmittauksesta saadun  $P_n$ -käyrän vertailu.  $P_n$ -arvot on laskettu Faradayn kupilla mitattujen hiukkaspitoisuuksien keskiarvojen perusteella. Virherajoina on käytetty yksittäiselle hiukkaskoolle laskettujen kolmen  $P_n$ -arvon keskihajontaa.

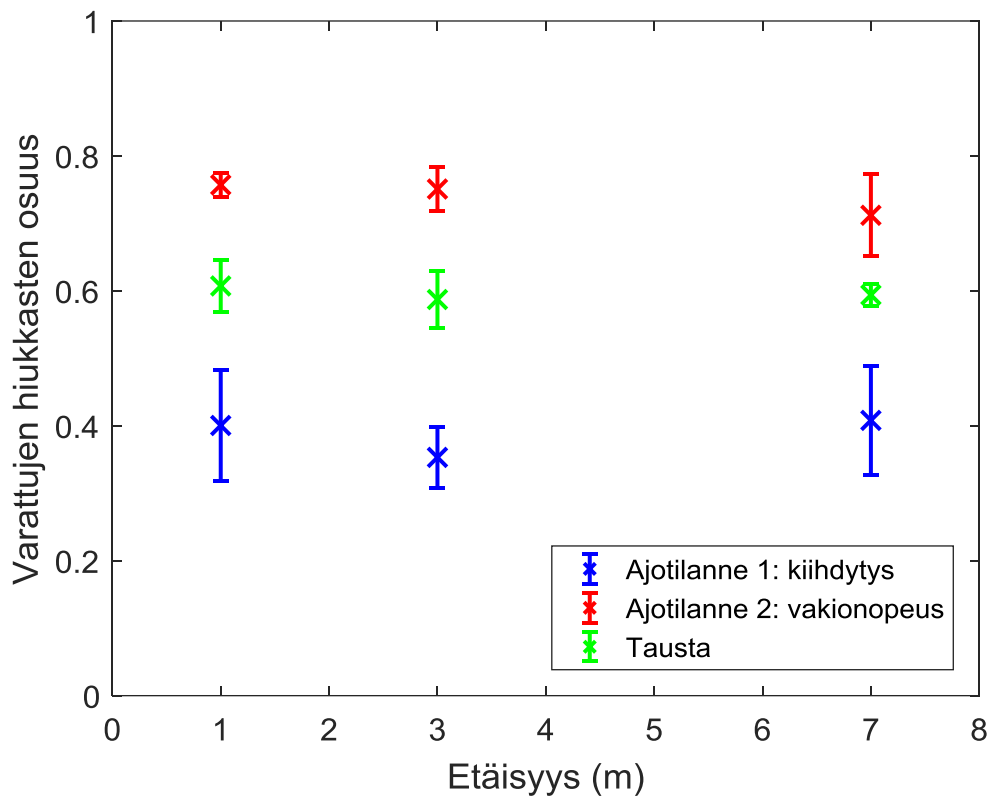
Kuvasta 19 nähdään, että perusasetuksilla ja testiasetuksilla saatujen mittausten tulokset eroavat toisistaan hieman. Niiden muodostamat kaaret ovat samanmuotoisia, mutta niissä tapahtuva voimakas kaareutuminen on havaittavissa eri hiukkaskokoalueilla. Välillä 100 – 200 nm eri asetuksilla saadut arvot näyttävät olevan samat. Tätä pienemmillä hiukkasilla testiasetuksilla saadut  $P_n$ -arvot ovat selkeästi suurempia kuin perusasetuksilla saadut arvot. Tämän voi mahdollisesti johtua testiasetuksilla syntyvästä suuremmasta virtausnopeudesta ja lyhyemmästä viipymäajasta. Perusmittauksissa diffuusiohäviöt vaikuttavat enemmän, koska aerosolin viipymäaika linjastossa on kaksi kertaa pidempi kuin testiasetuksilla tehdyissä mittauksissa. Suurten hiukkasten alueelta ei kannata tämän mittauksen perusteella tehdä johtopäätöksiä, koska mitatun hiukkaskokoalueen yläpäässä on mitattu testiasetuksilla ainoastaan yksi piste, joka poikkeaa merkittävästi perusasetuksilla saadusta arvosta. On toki mahdollista, että testiasetuksilla suurten hiukkaskokojen alueella impaktiohäviöiden merkitys korostuu. Suurempi virtausnopeus aiheuttaa suuremman liikemäärän suurille hiukkasille. Tämä lisää myös esim. kaareutuviin linjoihin tapahtuvien törmäysten todennäköisyyttä. Tulosten perusteella vaikuttaisi siltä, että eFilter sopii hyvin päästöjen mittaamiseen nokimoodin hiukkaskokoalueella myös testiasetuksilla.

## 5. OHIAJOMITTAUSTEN TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Seuraavissa kappaleissa esitetään ja analysoidaan merkittävimmät tulokset ohiajomitauksista. Kappaleessa 5.1 käsitellään kahden sähkösuodattimen kanssa toimineen CPC:n ja ilman sähkösuodatinta toimineen CPC:n avulla saatuja tuloksia. Kappaleessa 5.2 käsitellään eFilterin ja sähkösuodattimen avulla saatuja tuloksia ja verrataan niitä kappaleessa 5.1 saatuihin tuloksiin.

### 5.1 CPC-laitteiden avulla saadut tulokset

Kuvassa 20 on esitetty varattujen hiukkasten osuus päästöissä etäisyyden funktiona CPC:illä mitattuna. Kuvan pisteet kullekin etäisyydelle ja ajotilanteelle sekä taustalle on laskettu yksittäisten mittausten tulosten keskiarvona. Virherajoina toimii näiden laskettujen keskiarvojen keskihajonta. Varattujen hiukkasten osuus taustassa on esitetty vihreällä värillä. Punaisella ja sinisellä värillä merkityt pisteet vastaavat puolestaan ajotilanteita 1 ja 2 eli ajoa kiihdyttäen sekä ajoa vakionopeudella.



**Kuva 20.** Varattujen hiukkasten osuus päästöissä etäisyyden funktiona CPC-laitteilla mitattuna. Kuvassa on esitetty varattujen hiukkasten osuus päästöistä ajo-tilanteissa 1 ja 2 sekä varattujen hiukkasten osuus taustassa. Virherajoina käytettiin kullekin etäisyydelle laskettujen osuuksien keskihajontaa.

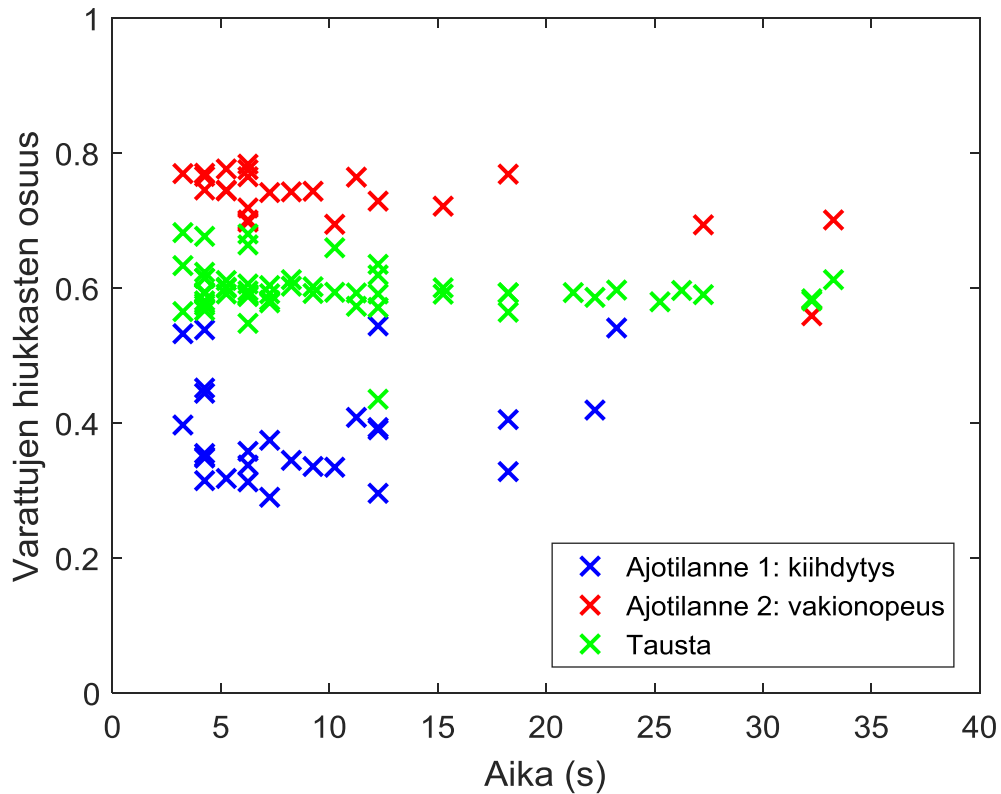
Kuvasta 20 havaitaan, että varattujen hiukkasten osuus taustassa on mittausten mukaan likimain 0,6. Kyseinen pitoisuus on sama kaikilta etäisyyksiltä mitattuna, kuten pitääkin. Tulosta voidaan pitää järkevänä, koska Taulukossa 1 varattujen hiukkasten osuus 100 nm kokoisille hiukkasille on samaa luokkaa. Tästä ei kuitenkaan voi tehdä täysin varmoja johtopäätöksiä ilman tarkempia tietoja taustailman hiukkasten kokojakaumasta. Kuvasta havaitaan lisäksi, että ajotilanteessa 1 varautuneiden hiukkasten osuus on huomattavasti taustan osuutta matalampi ja ajotilanteessa 2 huomattavasti taustan osuutta korkeampi kaikilla mittausetäisyyksillä. Ajotilanteen vaikutus varautuneiden hiukkasten osuuteen päästöissä on tämän tuloksen mukaan huomattava.

Ajotilanteiden ero voidaan mahdollisesti selittää sillä, että auton päästöihin syntyvän nukleatiomoodin pitoisuus olisi kiihdytystilanteessa paljon suurempi kuin vakionopeudella ajettaessa. Nukleatiomoodin hiukkaset ovat pieniä, joka tarkoittaa myös sitä, että ne eivät ole kovin todennäköisesti varattuja. Nukleatiomoodin hiukkasten on myös aiemmassa tutkimuksessa havaittu koostuvan pääosin neutraaleista hiukkasista (Mariq 2006). Tämä puolestaan johtaisi siihen, että kiihdytyksessä nukleatiomoodin hiukkasten suuri lukumäärä laskisi huomattavasti myös mitattua varattujen hiukkasten osuutta päästöissä.

Vakionopeudella ajettaessa nukleatiomoodin merkitys saattaa olla huomattavasti pienempi tai merkityksetön. Nukleatiomoodin ja nokimoodin suuruuksien erosta ei kuitenkaan tämän tutkimuksen perusteella ole mitään näyttöä, koska mittauksissa ei ole saatavilla dataa hiukkaskokojakaumasta. Tätä spekulatiota voidaankin tarkastella lähinnä pohjana tulevalle tutkimukselle.

Tarkastellaan seuraavaksi päästön varattujen hiukkasten osuutta etäisyyden suhteen. Kuten kappaleessa 2.1 kerrottiin, olisi odotettavaa, että varattujen hiukkasten osuus päästöissä lähenisi taustan pitoisuutta suuremmilla etäisyyksillä. Kuvan 20 perusteella vaikuttaisi siltä, että vakionopeudella tehtyjen ajojen päästöissä varautuneiden hiukkasten osuus päästöstä vähenisi hieman etäisyyden kasvaessa. Yhden ja kolmen metrin etäisyydellä osuus on noin 0,75 ja 7 metrin etäisyydellä osuus on laskenut suunnilleen arvoon 0,70. Tapahtunut muutos on kuitenkin mittausten virherajojen sisäpuolella, joten tämän tulos viittaa ennemminkin siihen, että neutraloitumista ei vielä tällä etäisyydellä ehdi kovin merkittävästi tapahtumaan. Kiihdytysajoa kuvaavissa mittauksissa ei ole myöskään havaittavissa selkeästi, että päästön varattujen hiukkasten osuus lähenisi taustan osuutta etäisyyden kasvaessa. Varattujen hiukkasten osuudet 1, 3 ja 7 metrin etäisyyksillä ovat noin 0,40 ja 0,35 sekä 0,40. Näissäkin mittauksissa tapahtuneet muutokset ovat selkeästi virherajojen sisäpuolella.

Etäisyyden perusteella laskettu päästön varauksen osuuden muutos ei ole kovin hyvä mittari, koska mittaustulos on hyvin riippuvainen tuuliolosuhteista. Hetkellinen tuulen nopeus vaikuttaa huomattavasti siihen, kuinka kauan päästön kulkeutuminen eri etäisyyksille kestää. Koska varauksen neutraloituminen on nimenomaan ajan funktio, on järkevämpää kuvata sen tapahtumista nimenomaan ajan suhteen eikä etäisyyden suhteen. Kuvassa 21 on esitetty varattujen hiukkasten osuus päästöissä ajan funktiona CPC:illä mitattuna. Kuvaan on piirretty ainoastaan niitä mittauksia vastaavat pisteet, joissa ajan mittauksen epävarmuus on alle 5 sekuntia. Yksittäiset pisteet kuvaavat Kuvassa 21 yksittäisiä mittauksia ja värikoodaukset ovat vastaavat kuin edellisessä kuvassa.



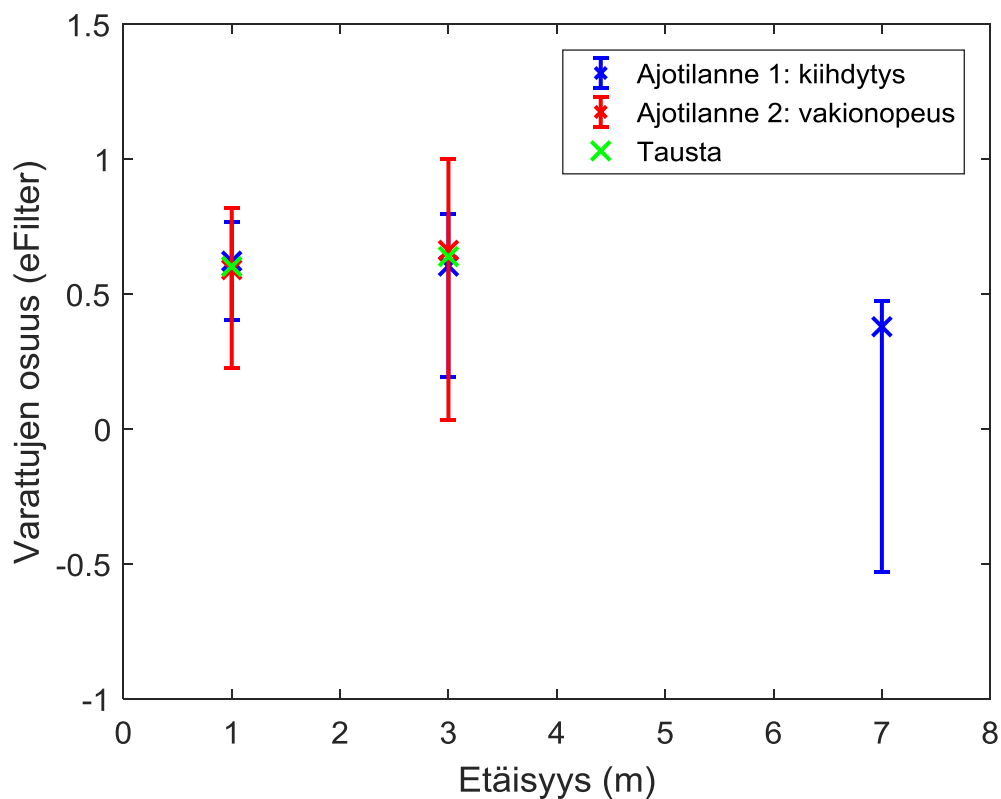
**Kuva 21.** Varattujen hiukkasten osuus päästöissä ajan funktiona CPC:illä mitattuna. Kuvaan on piirretty ainoastaan niitä mittauksia vastaavat pisteet, joissa ajan mittauksen epävarmuus on alle 5 sekuntia.

Kuvaa 21 tulkitessa on huomattava, että ensimmäiset mittauspisteet ovat esitettynä vasta noin 3 sekunnin kohdalla. Tämä johtuu siitä, että kyseinen 3 sekuntia on se aika, joka päästöllä kuluu Nuuskijan linjastossa. Kuvaa voidaan siis tulkita siten, että ajan hetkellä 0 päästöt ovat kohdanneet Partector 2:n, jonka jälkeen kestää vähintään 3 sekuntia ennen kuin ne saapuvat Nuuskijan sisällä oleville mittalaitteille.

Kuvasta 21 havaitaan, että ajan suhteen saadut tulokset ovat hyvin samankaltaisia etäisyyden funktiona saatujen tulosten kanssa. Suurin aika, jonka hiukkaset viettivät ilmassa, oli näissä mittauksissa noin 30 sekuntia. Varauksen osuuden muutokset ovat hyvin pieniä myös ajan suhteen tarkasteltuna kyseisellä aikavälillä. Toisaalta Kuvaa 21 tarkasteltaessa voidaan ehkä hieman selkeämmin sanoa, että myös ajotilanteessa 1 varattujen hiukkasten osuus saattaisi lähentyä taustan osuutta ajan kuluessa. On kuitenkin muistettava, että mitä pidemmälle aika-akselilla mennään, sitä harvemmassa mittauspisteet ovat. Tästä syystä kuvasta 21 havaittavat neutraloitumiseen viittaavat trendit eivät ole täysin luotettavia.

## 5.2 eFilterin avulla saadut tulokset

Kuvassa 22 on esitetty varattujen hiukkasten osuus päästöissä etäisyyden funktiona eFilterillä mitattuna. Kuvaa tulkitessa on huomattava, että lasketut virherajat on laskettu eri tavalla kuin edellisessä kappaleessa. Lisäksi kuvasta puuttuu taustalle lasketut virherajat, kuvan lukemisen selkeyttämiseksi. Siitä puuttuu myös 7 metrin etäisyydelle lasketut varattujen hiukkasten osuudet sekä taustalle että ajotilanteelle 2, koska kyseisten tulosten laskenta ei antanut tuloksia, joissa varattujen hiukkasten osuus olisi ollut järkevä, eli välillä 0 – 1. Tämä johtui todennäköisesti siitä, että 7m etäisyydellä pitoisuudet olivat laimentuneet niin pieniksi, ettei eFilterin vasteeseen ei tullut tarpeeksi selkeää signaalia. Kuvan värit värikoodaukset ovat vastaavat kuin edellisessä kappaleessa.



**Kuva 22.** Varattujen hiukkasten osuus päästöissä etäisyyden funktiona eFilterillä mitattuna. Virherajojen määrittäminen on esitetty kappaleessa 3.2.4.

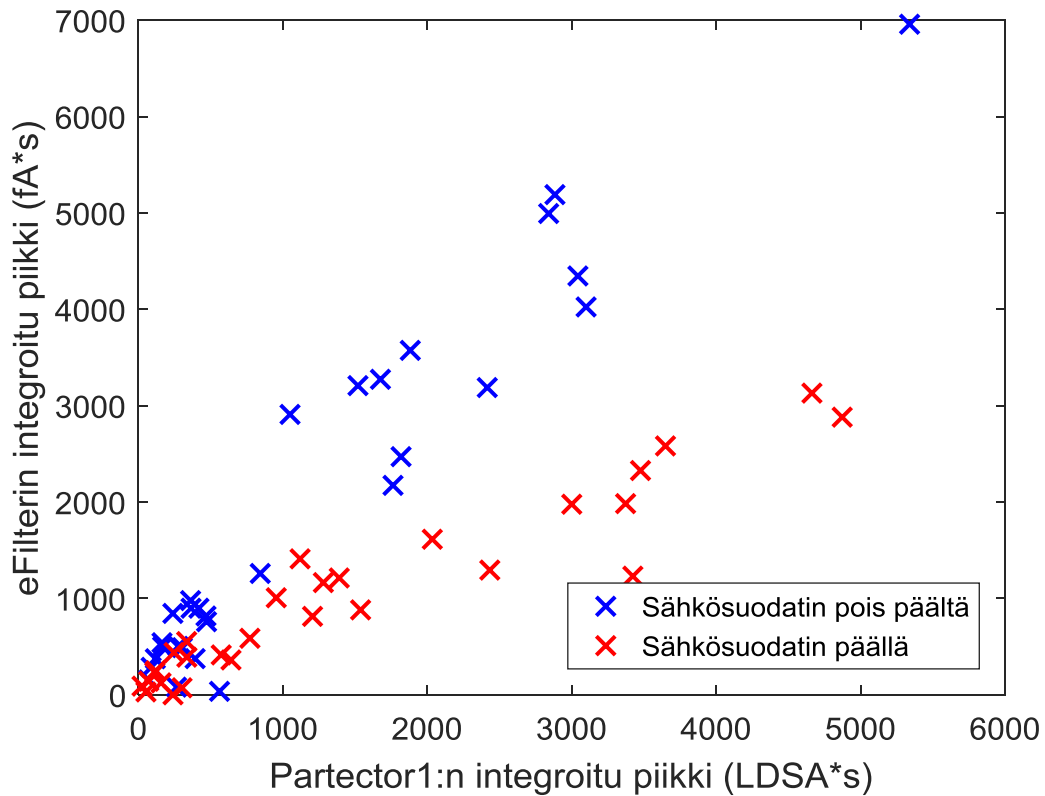
Kuvasta 22 havaitaan, että varattujen hiukkasten osuus taustassa vaikuttaisi olevan tälläkin mittaustavalla noin 0,6 luokkaa, mutta muut mittaustulokset poikkeavat huomattavasti tuloksista jotka saatiin CPC-laitteiden avulla. Mittausten perusteella vaikuttaisi, että sekä ajotilanteissa 1 että ajotilanteessa 2 varattujen hiukkasten osuus olisi hyvin lähellä taustan osuutta etäisyyksillä 1 ja 3 metriä. 7 metrin etäisyydellä puolestaan tulosten perusteella vaikuttaisi siltä, että varattujen hiukkasten osuus laskisi taustan osuutta alemmalle tasolle. Tuloksista nähdään myös, että lasketut virherajat ovat hyvin suuret jokai-

sella etäisyydellä. Vaikuttaa siis siltä, että näitä mittauksia ei voida pitää kovin luotettavina. Tämä johtuu siitä, että eFilterillä tehdyissä mittauksissa on useita ongelmakohtia. Ensinnäkin mittaussignaalin notkahdukset, mahdolliset häiriöt mittauksissa sekä taustakohinan suuruus ovat saattaneet vaikuttaa tuloksiin. Toinen suuri ongelma on se, että varautuneiden hiukkasten osuus jouduttiin laskemaan eri mittauskertojen tulosten avulla. Normeerauksella pystyttiin parantamaan tulosten luotettavuuteen hieman, mutta se ei tässä tapauksessa vaikuta auttavan kovin paljoa.

Jos kuitenkin tulkitaan niin, että eFilterin tulokset pitävät paikkansa etäisyyksillä 1 m ja 3m, niin miten tulokset voidaan selittää? Tulosten poikkeaminen edellisestä voi mahdollisesti johtua siitä, että eFilter ja CPC-laitteet mittaavat hiukkasia eri kokoalueilta. On mahdollista, että eFilter ei havaitse ollenkaan pieniä nukleatiomoodin hiukkasia, jolloin siltä jää myös havaitsematta suuri osa neutraaleista hiukkasista erityisesti ajotilanteella 1 tehdyissä mittauksissa. Tämä voi selittää sen, miksi eFilterin mukaan varattujen hiukkasten osuus on eFilterillä mitattuna suurempi kuin CPC-laitteilla mitattuna. Ajotilanteesta 2 saatua tulosta puolestaan ei tässä tapauksessa pystytä yhtä helposti selittämään.

Jotta saadaan selville varmemmin, että mistä eFilterin tulosten erilaisuus johtuu, voidaan tarkistaa, että onko tekemämme normeeraus Partector 1:llä järkevä. Tämä voidaan tehdä kuvan 23 avulla, jossa on esitetty eFilterin integroitujen piikkien arvot Partector 1:n integroitujen piikkien funktiona.

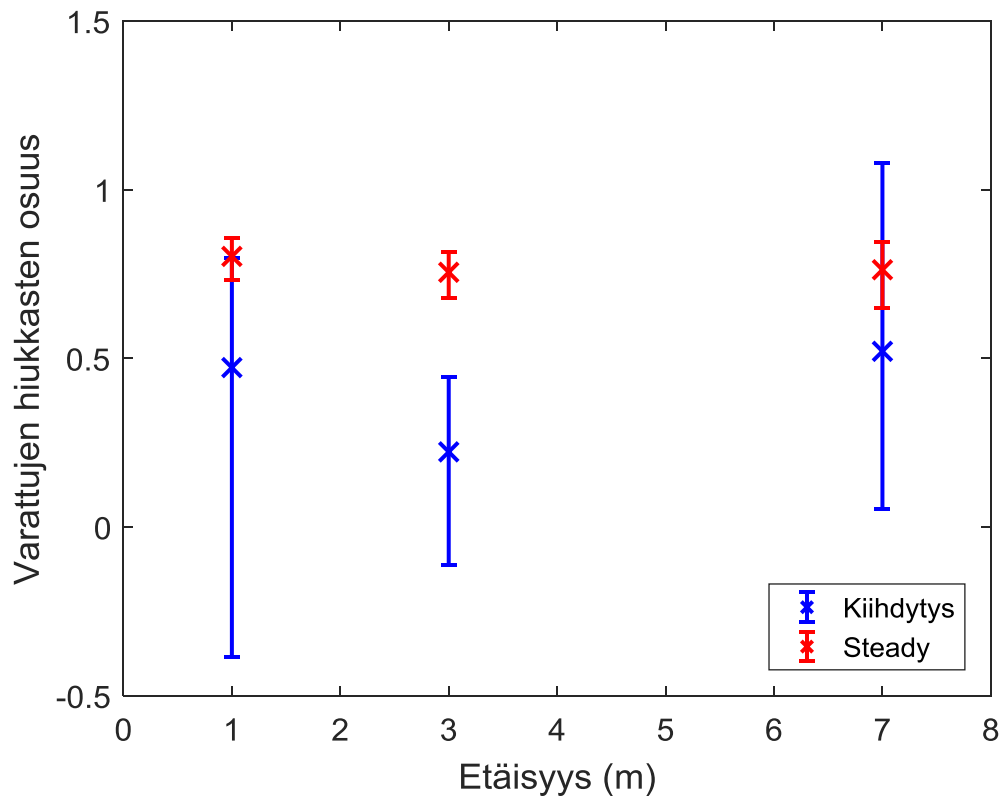




**Kuva 23.** *eFilterin ja Partector 1:n integroitujen piikkien vertailu*

Kuvasta 23 nähdään, että eFilterin ja Partector 1:n avulla mitatut arvot asettuvat kohtuullisen hyvin suoralle linjalle sekä tilanteessa, jossa eFilterin edessä oleva sähkösuodatin on päällä että tilanteessa jossa se ei ole päällä. Tämä viittaa siihen, että normeeraus on ollut järkevä ja parantaa tulosten laatua.

Normeerauksen tarkastelun lisäksi voidaan kokeilla, että mitä tuloksia saadaan CPC-laitteista, kun laskutoimitukset suoritetaan täsmälleen samalla tavalla ja vastaavista datapistteistä kuin eFilterin tulokset. Sähkösuodattimen kanssa toimivalta CPC-laitteelta valittiin käsittelyyn kymmenestä yksittäisen etäisyyden mittauksesta vain ne viisi mittausta, joiden aikana eFilterin sähkösuodatin oli päällä. Ilman sähkösuodatinta toimivalta CPC-laitteelta puolestaan valittiin ne viisi mittausta, joiden aikana eFilterin sähkösuodatin oli pois päältä. Kyseisten CPC-laitteiden mittausten tulosten avulla laskettiin tämän jälkeen varattujen hiukkasten osuus päästöissä eri etäisyyksillä mittauspikkien pinta-alojen normeerattujen keskiarvojen avulla. Kuvassa on 24 esitetty kyseiset CPC-laitteiden mittausten avulla lasketut tulokset.



**Kuva 24.** CPC-laitteella mitattu varattujen hiukkasten osuus päästöissä etäisyyden funktiona vaihtoehtoisella laskentatavalla. Tulokset on laskettu CPC-laitteiden datasta siten, että mittauspisteet ja laskentatapa ovat samat kuin ne, joita käytettiin eFilterin tulosten laskentaan. Virherajojen määrittäminen on esitetty kappaleessa 3.2.4.

Kuvasta 24 nähdään, että tulokset ovat hyvin lähellä aikaisemmin saatuja CPC-laitteilla laskettuja tuloksia. Toisaalta virherajat muodostuvat tässäkin tapauksessa hyvin suuriksi. Kuvan 24 tulokset ja niiden samankaltaisuus Kuvan 20 tulosten kanssa viittaavat kuitenkin siihen, että eFilterin avulla saatujen tulosten poikkeamat eivät johdu laskentamenetelmästä.

Tämän myötä voidaan tehdä se johtopäätös, että eFilterillä saatujen tulosten poikkeamat CPC-laitteilla saatuihin tuloksiin verrattuna voivat johtua kahdesta syystä. Ensimmäinen syy on se, että CPC-laitteet ja eFilter mittaavat hiukkasia eri hiukkaskokoalueilta, jolloin myös niillä mitattu varattujen hiukkasten osuus muodostuu erisuuruiseksi. Toinen mahdollinen syy on se, että eFilterin signaalin epätasaisuus on vaikuttanut tuloksiin. Näiden mittausten perusteella kahden edellä mainitun syyn merkittävydestä ei voida tehdä johtopäätöksiä. Tarkempien analyysien tekemiseksi pitäisi olla saatavilla tieto myös hiukkasten kokojakaumasta.

## 6. YHTEENVETO

Mittausten ensimmäisessä vaiheessa, eli eFilterin karakterisointimittauksissa tarkoituksena oli tutkia laitteen toimintaa, kun eri parametreja muutetaan ja selvittää kuinka hyvin se sopii dieselpäästöjen mittaamiseen. Ensisijaisesti halusimme saada selville, kuinka laite toimii eri kokoisia hiukkasia mitattaessa. Mittauksissa määritimme laitteelle Pn-käyräsovitteen hiukkaskokovälille 15 – 2500 nm. Tulosten perusteella voidaan sanoa, että eFilterin toiminta on normaaliasetuksilla luotettavinta suunnilleen hiukkaskokovälillä 50 – 500 nm. Tätä väliä pienempien hiukkaskokojen mittauksen epävarmuutta lisäävät diffuusiohäviöt sekä mittalaitteen taustakohinan vaikutus. Suurempien hiukkaskokojen kohdalla puolestaan impaktiohäviöiden merkitys korostuu.

Lisäksi tutkimme hiukkaspitoisuuden ja mitattavien hiukkasten varauksen vaikutusta eFilterin toimintaan. Hiukkaspitoisuuden vaikutusta tutkimme välillä 1000 – 50000 1/cm<sup>3</sup>, hiukkaskoon ollessa 100 nm. Kyseisellä välillä hiukkaspitoisuuden ei havaittu vaikuttavan mittaustulokseen, kun hiukkaskoko pidettiin vakiona. Neutraalien hiukkasten mittauksen johtopäätöksenä puolestaan oli, että eFilter toimii samalla tavalla sekä neutraaleilla hiukkasilla, että negatiivisesti kerran varatuilla hiukkasilla. Tämä viittaa siihen, että mitattavien hiukkasen varauksella ei ole vaikutusta mittaustulokseen.

Viimeisenä osa-alueena karakterisointimittauksissa oli tutkia laitteen toimintaa myös ns. testiasetuksilla, jolloin laitteen läpi kulkeva tilavuusvirta ja trap-jännite poikkesivat normaalista. Testiasetuksia haluttiin kokeilla siksi, että myöhemmin tehtävissä ohiajomittauksissa eFilterin yhteydessä käytettävä sähkösuodatin on mitoitettu tilavuusvirralle 1 l/min. Mittauksen tuloksena selvisi, että hiukkaskokovälillä 100 – 200 nm laite toimii samalla tavalla kuin normaaliasetuksillakin. Tätä väliä pienemmillä hiukkasilla oletettavasti diffuusiohäviöiden suuruus on pienempi testiasetuksilla normaaliasetuksiin verrattuna. Yli 200 nm hiukkasilla puolestaan impaktiohäviöiden suuruus vaikuttaisi olevan testiasetuksilla suurempi kuin kuin normaaliasetuksilla.

Yleisesti ottaen eFilterin mittaustulosten perusteella vaikuttaisi, että laite soveltuu hyvin dieselpäästöjen nokimoodin hiukkasten mittaamiseen, koska sille luotettavin toiminta-hiukkaskokoalue on 50 – 500 nm. Toisaalta mittauksissa havaittiin myös, että laitteen mittaussignaalin tapahtui säännöllisesti odottamattomia notkahduksia. Notkahdusten suhteellinen vaikutus mittaustuloksiin oli sitä merkittävämpi, mitä suurempia hiukkasia tarkasteltiin. Syytä notkahduksille ei tässä työssä kyetty selvittämään eikä tiedetä varmasti ovatko ne ainoastaan kyseiselle laitteelle ominaisia. Jos notkahdukset ovat laitteelle ominaisia, niin ne voivat aiheuttaa merkittävääkin epätarkkuutta laitteen mittauksissa etenkin, jos mittauksia täytyy tarkastella reaaliaikaisesti eikä pidempien ajanjaksojen keskiarvona.

Mittausten toisessa vaiheessa, eli ohiajomittauksissa tarkoituksenamme oli tutkia pääasiassa kahta asiaa: dieselmoottorin päästöjen varaustilan muutosta ajan ja etäisyyden funktiona sekä eFilterin toimintaa päästömittauksissa. Päästöjen suhteen huomattavin tulos oli se, että varattujen hiukkasten osuus päästöistä riippuu huomattavasti ajotilanteesta. Tämä voi mahdollisesti johtua siitä, että kiihdytyksen yhteydessä päästöihin syntyy hyvin paljon pieniä neutraaleja hiukkasia sisältävä nukleaatiomoodi, joka laskee varattujen hiukkasten kokonaisosuutta päästöissä huomattavasti. Tulevaisuudessa päästöjen varaustilaan liittyvissä tutkimuksissa olisi tärkeää selvittää varattujen hiukkasten osuus ja sen muutokset kokoluokittain, jotta saataisiin tarkempaa tietoa esimerkiksi nukleaatiomoodin vaikutuksesta varattujen hiukkasten kokonaisosuuteen.

CPC-laitteilla saatujen tulosten perusteella voidaan sanoa, että vakionopeudella ajettaessa varattujen hiukkasten osuus päästöistä 1 metrin mittausetäisyydellä on noin 75 %. Mitattu osuus on hyvin linjassa aiemman tutkimuksen kanssa, jonka mukaan varattujen hiukkasten osuus vakionopeudella ajettaessa olisi välillä 60 – 80 % (Mariq 2012). Päästön saavuttua ilmaan varattujen hiukkasten osuuden havaittiin pysyvän lähes vakiona tutkitulla alueella etäisyyden ja ajan funktiona. Ainoastaan hyvin pieni varattujen hiukkasten osuuden lasku oli havaittavissa, mutta muutoksen suuruus oli pieni mittausten virherajoihin verrattuna, joten sitä ei voida näiden tulosten perusteella varmentaa. Kiihdyttäen ajettaessa varattujen hiukkasten osuus päästöistä 1 metrin mittausetäisyydellä on noin 40 %. Aikaisempaa tutkimusta varattujen hiukkasten osuudesta kiihdyttävän auton päästöistä ei ole, joten tulos on merkittävä. Myös tässä tapauksessa varattujen hiukkasten osuuden havaittiin pysyvän likimain vakiona etäisyyden ja ajan funktiona. Taustassa varattujen hiukkasten osuudeksi mitattiin noin 60 %. Näiden tulosten perusteella voidaan siis sanoa, että teorian mukaista päästöjen neutraloitumista ei tapahdu huomattavasti vielä 7 metrin etäisyydellä tai 30 sekunnin aikana. Aiemmassa tutkimuksessa (Lee et al. 2012) oli puolestaan havaittavissa selkeä varattujen hiukkasten osuuden lasku. Tämä ero johtuu todennäköisesti siitä, että omassa tutkimuksessamme taustan vaikutus on poistettu ja tulokset kuvaavat varattujen hiukkasten osuutta pelkästään päästöissä. Tutkimuksessa (Lee et al. 2012) taustan osuuden vaikutusta varattujen hiukkasten osuuteen ei ole poistettu. Tämä tarkoittaa sitä, että tutkimuksessa (Lee et al. 2012) varattujen hiukkasten osuus on voinut laskea nopeasti päästön ja taustan sekoittumisen vuoksi eikä siksi, että päästön sisältämät varautuneet hiukkaset olisivat neutraloituneet. Näiden tulosten pohjalta tulevissa tutkimuksissa olisi järkevää tutkia neutraloitumista pidemmällä etäisyyksillä ja aikaskaaloilla. Lisäksi voitaisiin tutkia miten yksittäisestä mittauksesta saadut tulokset eroavat, kun tutkitaan varattujen hiukkasten osuuden muutoksia silloin kun päästön vaikutus poistetaan ja silloin kun päästön vaikutusta ei poisteta.

eFilterillä tehtyjen ohiajomittausten perusteella voidaan sanoa, että laite vaikuttaisi soveltuvan kyseisiin mittauksiin kohtalaisen hyvin. eFilterin pieni koko tekee laitteesta huomattavasti kätevämmän CPC-laitteisiin verrattuna. Lisäksi eFilterillä kyettiin reaaliaikai-

sesti havaitsemaan ohiajavan auton päästöjä samaan tapaan kuin CPC-laitteellakin. eFilterin avulla saaduista ohiajomittausten tuloksista on kuitenkin sekä laitteesta, että mittaussjärjestelyistä johtuvaa epävarmuutta. Mittauksissa havaittiin, että eFilterin mittaus-signaali poikkesi välillä huomattavastikin muista mittalaitteista. Lisäksi laitteen signaalin taustakohinan suuruus vaikuttaa siihen, että erityisesti pienten lyhytaikaisten pitoisuuksien mittaamisessa on epätarkkuutta. Tämä tulee ottaa huomioon, kun laitetta aiotaan hyödyntää vastaavissa mittauksissa. Huomionarvoista on myös se, että 1 ja 3 metrin etäisyydellä saadut tulokset kyseisellä laitteella vaikuttivat poikkeavan CPC-laitteilla saaduista tuloksista. Tämän katsottiin johtuvan todennäköisesti joko eFilterin mittauksen epätarkkuudesta tai siitä, että eFilter ja CPC-laitteet mittaavat hiukkasia eri hiukkaskokoalueilta. eFilterin mittausalue ei ulotu aivan yhtä pieniin hiukkasiin kuin tässä työssä käytetyillä CPC-laitteilla, jolloin osa nukleaatiomoodin hiukkasista jää eFilterin mittausalueen ulkopuolelle. Varattujen hiukkasten osuudeksi saatiin eFilterillä mitattuna 1 ja 3 metrin etäisyyksillä noin 60 % ajotilanteesta riippumatta, joka on sama kuin taustan osuus. Tuloksesta ei kannata kuitenkaan kannata tehdä johtopäätöksiä suurten virhemarginaalien vuoksi. Jos eFilteriä halutaan käyttää vastaavissa mittauksissa tulevaisuudessa, niin on suositeltavaa suorittaa mittaukset kahta eFilteriä hyödyntäen samaan tapaan kuin CPC-laitteita hyödynnettiin tässä tutkimuksessa.

## LÄHTEET

Abdul-Khalek, I., Kittelson, D., Graskow, B., Wei, Q. (1998). Diesel Exhaust Particle Size: Measurement Issues and Trends. SAE International. Saatavissa: <http://papers.sae.org/980525/>

Dekati Ltd. (2017). Dekati eFilter User Manual ver. 1.11.

Dhaniyala, S., Fierz, M., Keskinen, J., Marjamäki M. (2011). Instruments based on electrical detection of aerosols. Aerosol Measurement. 3<sup>rd</sup> edition. John Wiley & Sons. s. 393-416. Saatavissa: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118001684.ch18/pdf>

Elementary charge. (2017). Wikipedia-artikkeli. Viitattu: 13.8.2017. Saatavissa: [https://en.wikipedia.org/wiki/Elementary\\_charge](https://en.wikipedia.org/wiki/Elementary_charge)

Hinds W.C. (1982). Aerosol technology. John Wiley & Sons. s. 284-309.

Institute for Health Metrics and Evaluation & the Health effects institute. (2017). State of Global Air. Saatavissa: [https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/SOGA2017\\_report.pdf](https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/SOGA2017_report.pdf)

Jayarathne, E.R., Ling, X., Morawska, L. (2014). Observation of ions and particles near busy roads using a neutral cluster and air ion spectrometer (NAIS). Atmospheric Environment. Volume 84. s. 198-203. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231013008959>

Kittelson, D.B. (1998). Engines and nanoparticles: a review. Journal of Aerosol Science. Volume 29. Issues 5–6. s. 575-588. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850297100374#FIG3>

Kittelson, D.B. (2000). Measurement of Engine Exhaust Particle Size. University of Minnesota. Center for Diesel Research. Saatavissa: <http://www.me.umn.edu/centers/mel/reports/dbkucdavis.pdf>

Lee, E.S., Xu, B., Zhu, Y. (2012). Measurements of ultrafine particles carrying different number of charges in on- and near-freeway environments. Atmospheric Environment. Volume 60. s. 564-572. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231012006693>

Lähde, T. (2013). Physical Characterization of Diesel Exhaust Nucleation Mode Particles. Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu 1168.

Mariq, M. (2006). On the electrical charge of motor vehicle exhaust particles, *Journal of Aerosol Science*. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850205001643>

Pant, P., Shukla, A., Kohl, S.D., Chow, J.C., Watson, J.G., Harrison, R.G. (2015) Characterization of ambient PM<sub>2.5</sub> at a pollution hotspot in New Delhi, India and inference of sources. *University of Birmingham* s. 178-189. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231015002034>

Rönkkö, T., Virtanen, A., Vaaraslahti, K., Keskinen, J., Pirjola, L., Lappi, M. (2006). Effect of dilution conditions and driving parameters on nucleation mode particles in diesel exhaust: Laboratory and on-road study. *Atmospheric Environment*. Volume 40. Issue 16. s. 2893-2901. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231006000434?via%3Dihub>

TTY-Säätiö. 2016-2019. Traffic and air quality in India: technologies and attitudes (TAQIITA). Saatavissa: [https://extranet.tekes.fi/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_webapp=/ibi\\_apps&IBIC\\_server=EDASERVE&IBIWF\\_msgviewer=OFF&IBIF\\_ex=O\\_PROJEKTI\\_RAP1&CLICKED\\_ON=&YPROJEKTI=12329680&YTARKASTELU=Z&YKIELI=S&YHANKE-TYYPPI=11&IBIAPP\\_app=opendata&YMUOTO=HTML](https://extranet.tekes.fi/ibi_apps/WFServlet?IBIF_webapp=/ibi_apps&IBIC_server=EDASERVE&IBIWF_msgviewer=OFF&IBIF_ex=O_PROJEKTI_RAP1&CLICKED_ON=&YPROJEKTI=12329680&YTARKASTELU=Z&YKIELI=S&YHANKE-TYYPPI=11&IBIAPP_app=opendata&YMUOTO=HTML)

Vu, T.V., Delgado-Saborit, J.M., Harrison, R.M. (2015). Review: Particle number size distributions from seven major sources and implications for source apportionment studies. *Atmospheric environment*. Volume 122. s. 114-132. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231015303691?via%3Dihub>

Yli-Ojanperä, J., Mäkelä, J.M., Marjamäki, M., Rostedt, A., Keskinen J. (2010). Towards traceable particle number concentration standard: Single charged aerosol reference (SCAR). *Journal of Aerosol Science*. Volume 41. Issue 8. s. 719-728. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850210001072>